

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí



Mostový nakladač borité rudy

Boric ore loading machine

Student:

Bc. Monika Kubzová

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra konstrukcí

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Monika Kubzová**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb
Téma: **Mostový nakladač borité rudy**
Boric ore loading machine

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce:

1. Navrhněte nosnou ocelovou konstrukci mostového nakladače borité rudy. Při návrhu ocelové konstrukce vycházejte z podkladů dodaných společností VITCRANE, s.r.o.
2. Ocelovou konstrukci mostu posuďte v souladu normou EN 1993-1-5.
3. K navrženému konstrukčnímu řešení mostového nakladače vypracujte potřebnou projektovou dokumentaci (přehledné výkresy ocelové konstrukce, technickou zprávu a výkaz materiálu).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-X Zatížení konstrukcí (příslušné části). Praha: ČNI.
- [3] ČSN EN 1993-1-1 Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006.
- [4] ČSN EN 1993-1-8 Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků. Praha: ČNI, 2006.
- [5] ČSN EN 1993-8-1 Eurokód 8: Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006.
- [6] ČSN EN 1993-1-5 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn. Praha, UNMZ, 2008.
- [7] ČSN 27 7008 Navrhování ocelových konstrukcí rypadel, nakladačů a zakladačů. Praha: ČNI, 2007.
- [8] www.access-steel.com.
- [9] Contemporary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements". ECCS, October 2007. ISSN 1018-5593.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.**

Datum zadání: 27.02.2015

Datum odevzdání: 30.11.2015



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Klimkovicích dne 27. listopadu 2015

.....
Bc. Monika Kubzová

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBT-UO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Klimkovicích dne 27. listopadu 2015

.....
Bc. Monika Kubzová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat všem, kteří mi jakkoli pomohli a podporovali mě při tvorbě mé diplomové práce. Děkuji panu doc. Ing. Antonínu Lokajovi, Ph.D. a panu Ing. Plachkému za poskytnutí podkladů a rad ohledně statického řešení dané konstrukce shrnovače.

Zvláštní poděkování pak patří vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Vítovi Křivému, Ph.D. za podporu, cenné rady, odbornou pomoc a připomínky k řešenému statickému posudku, za možnost pracovat na zajímavém tématu a také za množství času věnovaného při konzultacích.

Anotace

Předmětem diplomové práce je statický posudek bočního mostového shrnovače MBSk 600 sloužícího pro rozrušování a následné odebrání borité rudy. Stroj je lokalizován v kryté hale v seizmicky aktivní oblasti Turecka. Základní geometrie a parametry stroje vyplývají z poskytnuté dokumentace firmy VITCRANE s r.o. Diplomová práce se zabývá statickým posouzením jednotlivých částí shrnovače, jejich hlavních nosných prvků a spojů. Zvláštní pozornost je věnována statickému posouzení hlavního tenkostěnného uzavřeného nosníku s použitím skořepinového numerického modelu a se zohledněním geometricky a fyzikálně nelineárního chování konstrukce včetně předpokladu počáteční imperfektní konstrukce.

Klíčová slova

Boční mostový shrnovač, statický posudek, globální geometricky a materiálově nelineární analýza, seismická, tenkostěnný uzavřený průřez, boulení.

Annotation

The subject of this thesis is a static report of the overhead loading machine MBSk 600 serving for breaking and subsequent removal of boric ore. The machine is located in the hall in a seismically active areas of Turkey. Basic geometry and machine parameters were obtained from the documentation by company VITCRANE s r.o. The thesis deals with static report of individual parts of the machine, the main structural elements and connections. Special attention is paid to the static assessment of the main beam of thin-walled closed using by shell numerical model and taking into account the geometric and physically non-linear behavior of the structure, including initial imperfect construction.

Keywords

Overhead loading machine, statical analysis, global geometric and physically non-linear analysis, seismicity, box girder, buckling.

Obsah

1 Úvod	15
2 Návrh rozrušovací brány.....	16
2.1 Posudek konstrukce na MSÚ.....	20
2.2 Posudek na MSP	30
2.3 Posudek styčníků	33
2.3.1 Posudek svařovaného styčnicku: Y-styčnick	33
2.3.2 Posudek svařovaného styčnicku: K-styčnick	35
2.3.3 Posudek svařovaného styčnicku: X-styčnick	38
2.3.4 Posudek svarového přípoje diagonály	43
2.3.5 Posudek svařovaného styčnicku: Y-styčnick	44
2.3.6 Posouzení čepového spoje dle normy ČSN EN 1993-1-8.....	47
2.3.7 Posudek čepového spoje pomocí skořepinového modelu	55
3 Numerický model konstrukce vozíku v provozním stavu.....	57
3.1 Konstrukce kladkostroje	57
3.1.1 Posudek lana.....	57
3.1.2 Geometrické charakteristiky konstrukce kladkostroje.....	60
3.1.3 Zatížení konstrukce kladkostroje	60
3.1.4 Návrh pochozího roštu revizní lávky.....	62
3.2 Vozík MBSk600.....	63
3.2.1 Zatížení konstrukce vozíku	64
3.2.2 Návrh pochozího roštu	75
3.2.3 Zatížení od rozrušovače borité rudy	76
3.2.4 Dynamické zatížení svislé a vodorovné ve směru podélné osy:	78
3.2.5 Numerický model vozíku	78
4. Návrh a statické posouzení konstrukce vozíku	79
4.1 Návrh a statické posouzení nosných prvků konstrukce pro kladkostroj	80
4.1.1 Návrh a posudek sloupu konstrukce	80

4.1.2	Návrh a posudek podporového nosníku pochozího roštu	84
4.1.3	Návrh a posudek vodorovného nosníku v horní části konstrukce	88
4.2	Návrh a posudek styčníků konstrukce pro kladkostroj	91
4.2.1	Návrh a posudek svařovaného T-styčnicku podporových nosníků pochozího roštu	91
4.2.2	Návrh a posudek svařovaného zalomeného styčnicku	95
4.2.3	Návrh a posudek svařovaného zalomeného styčnicku	96
4.2.4	Návrh a posudek montážního spoje sloupu konstrukce kladkostroje ..	100
4.3	Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce pro kladkostroj	106
4.3.1	Vodorovné prvky	106
4.3.2	Svislé prvky	107
4.4	Návrh a posudek konstrukce vozíku	108
4.4.1	Návrh a posudek podporových nosníků pod pochozím roštem	108
4.4.2	Návrh a posudek podporových nosníku pod motorem	114
4.4.3	Návrh a posudek příčných nosníků v místě umístění motoru.....	118
4.4.4	Posudek příčného nosníku pod kladkostrojem.....	123
4.4.5	Posudek uzavřeného hlavního příčného nosníku.....	126
4.4.6	Návrh a posudek podélného nosníku vozíku.....	132
4.4.7	Návrh a posudek sloupu konstrukce vozíku	136
4.4.8	Posudek výztuhy vozíku	142
4.4.9	Posudek spodní výztuhy vozíku	146
4.5	Posudek styčníků konstrukce vozíku	146
4.5.1	Posudek svařovaného styčnicku nosníku tvořícího podporu pochozímu roštu ..	147
4.5.2	Posudek šroubového přípoje nosníku HEA200 a HEA160	152
4.5.3	Posudek montážního přípoje pomocí čelních desek příčného nosníku	154
4.5.4	Montážní šroubovaný přípoj s čelními deskami podélného nosníku ..	164
4.5.5	Posudek svarového zalomeného styčnicku sloupu.....	172

4.5.6	Posudek šroubového přípoje v místě umístění čepového spoje rozrušovače k vozíku	174
4.5.7	Přípoj skloněné výztuhy pomocí čelních desek	180
4.5.8	Přípoj spodní výztuhy pomocí čelních desek	184
4.5.9	Svařovaný K styčník výztuh s mezerou	187
4.6	Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce vozíku	190
4.6.1	Vodorovné prvky	190
4.6.2	Svislé prvky	191
4.6.3	Výztužné prvky	191
5	Numerický model konstrukce vozíku v montážním stavu	193
5.1	Zatížení konstrukce kladkostroje	193
5.2	Zatížení konstrukce vozíku	193
5.3	Numerický model vozíku v montážním stavu	194
5.4	Návrh a statické posouzení nosných prvků konstrukce pro kladkostroj v montážním stavu	194
5.4.1	Návrh a posudek sloupu konstrukce vozíku	194
6	Návrh a posudek konstrukce pro vyhrnovací řetěz	197
6.1	Zatížení konstrukce	198
6.2	Návrh a posudek vodorovného nosníku HEA200	203
6.3	Posudek hlavní příčle konstrukce RHS 150x100x5	208
6.4	Posudek krajní příčle konstrukce SHS 100x100x5	212
6.5	Posudek vnitřní příčle konstrukce SHS 100x100x5	217
6.6	Posudek krajní příčle konstrukce RHS 120x80x5	218
6.7	Návrh a posudek sloupku HEB300	223
6.8	Návrh a posudek sloupku HEB160	225
6.9	Návrh a posudek podélného nosníku HEB160	230
6.10	Návrh a posudek vnitřního sloupku HEA200	235
6.11	Návrh a posudek podélného nosníku ½ IPE200 pod řetězem	240
6.12	Návrh a posudek skloněné výztuhy SHS 88,9x4	245
6.13	Návrh a posudek styčnicků konstrukce vyhrnovacího řetězu	247
6.13.1	Přípoj podélného nosníku HEB160 na sloup HEB160	247

6.13.2	Svařovaný přípoj vzpěry CHS 88,9x4 na sloup HEB300.....	258
6.13.3	Svařovaný přípoj prvku SHS 100x100x5 a HEA200.....	259
6.13.4	Svařovaný přípoj rovného prvku SHS 100x100x5 a HEA200.....	261
6.13.5	Přípoj sloupu HEA200 a vodorovného nosníku HEA200.....	262
6.13.6	Přípoj vodorovného prvku SHS 150x100x5 a HEA200	267
6.13.7	Přípoj sloupu HEB300 ke konstrukci mostu shrnovače	268
6.13.8	Přípoj sloupu HEA200 ke konstrukci mostu shrnovače	272
6.14	Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce vyhrnovacího řetězu.....	276
6.14.1	Vodorovné prvky	276
6.14.2	Svislé prvky	277
6.14.3	Výztužné prvky	278
7	Hlavní nosník mostového shrnovače	279
7.1	Statický model hlavního nosníku konstrukce	279
7.2	Zatížení konstrukce	281
7.2.1	Seismické zatížení.....	293
7.3	Návrh a posudek hlavního uzavřeného nosníku	309
7.3.1	Minimální požadavky na podélné výztuhy	313
7.3.2	Minimální požadavky na příčné výztuhy	318
7.3.3	Posouzení prosté ohybové únosnosti (ohyb kolem osy y)	326
7.3.4	Posouzení prosté ohybové únosnosti (ohyb kolem osy z)	353
7.3.5	Posouzení ztráty příčné a torzní stability.....	378
7.3.6	Posouzení únosnosti průřezu v tahu	378
7.3.7	Posouzení únosnosti průřezu v tlaku.....	379
7.3.8	Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové síly.....	384
7.3.9	Posudek průřezu dle předpisu ČSN EN 1993-1-5 4.6.....	389
7.4	Návrh a posudek uzavřeného průřezu v místě náběhu	394
7.4.1	Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy y)	396
7.4.2	Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy z)	398
7.4.3	Posudek na únosnost v tahu	401

7.4.4	Posouzení únosnosti průřezu v tlaku.....	402
7.5	Návrh a posudek krajního uzavřeného průřezu	406
7.5.1	Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy y)	408
7.5.2	Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy z)	412
7.5.3	Posudek na únosnost v tahu	416
7.5.4	Posouzení únosnosti průřezu v tlaku.....	417
7.6	Smyková odolnost vnitřního komorového průřezu	421
7.6.1	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z	421
7.6.2	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	425
7.6.3	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y	425
7.6.4	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	428
7.7	Smyková odolnost uzavřeného průřezu náběhu.....	429
7.7.1	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z	429
7.7.2	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	430
7.7.3	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y	430
7.7.4	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	431
7.8	Smyková odolnost krajního uzavřeného průřezu	432
7.8.1	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z	432
7.8.2	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	433
7.8.3	Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y	434
7.8.4	Interakce ohybového momentu a posouvající síly.....	435
7.9	Posudek únosnosti na příčné síly dle EN 1993-1-5 kap. 6	435
7.10	Posouzení boulení stěny od ohybu tlačené pásnice	444
7.11	Interakce mezi příčnou silou, ohybovým momentem a osovou silou.	445
7.12	Posudek svarového přípoje pásnice a stěny.....	447
7.13	Posudek hlavního nosníku na MSP	447
8	Statická analýza metodou konečných prvků	449
8.1	Skořepinový model konstrukce	450
8.2	Zvolené kombinace zatížení	450
8.3	Zatížení skořepiny v software Scia Engineer	452

8.4	Kombinace zatěžovacích stavů.....	459
8.5	Stabilitní analýza konstrukce.....	459
8.5.1	Stabilitní tvary kombinace pro maximální smykovou sílu V_z	460
8.5.2	Stabilitní tvary kombinace pro maximální ohybové momenty M_z a M_y	464
8.5.3	Stabilitní tvary kombinace pro maximální smykovou sílu V_y	466
8.5.4	Stabilitní tvary kombinace pro maximální normálovou sílu N	466
8.6	Geometricky nelineární analýza konstrukce (GNIA)	468
8.6.1	Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální smykovou sílu V_z	469
8.6.2	Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální ohybový moment M_y a M_z	476
8.6.3	Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální smykovou sílu V_y	482
8.6.4	Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální normálovou sílu N	482
8.7	Účinky geometrického nelineárního výpočtu.....	488
8.8	Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce (GMNIA)	490
8.8.1	Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální ohybové momenty M_y a M_z	491
8.8.2	Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální osovou sílu N	494
8.8.3	Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální smykovou sílu V_z	496
9	Závěr	503
10	Seznam obrázků a tabulek	505
10.1	Seznam obrázků	505
10.2	Seznam tabulek	514
11	Seznam použitých pramenů	516
11.1	Literatura	516
11.2.	Normy.....	516

11.3.	Internetové zdroje	517
11.4.	Podklady	517
12	Seznam příloh	518
13	Použitý programový software	520

Seznam použitého značení

A	plocha průřezu	[mm ²]
$A_{c,eff,loc}$	průřezová plocha s vlivem lokálního boulení	[mm ²]
A_{eff}	efektivní plocha průřezu třídy 4	[mm ²]
A_{gr}	průřezová plocha původního průřezu třídy 4	[mm ²]
A_s	plocha jádra šroubu	[mm ²]
$A_{s,lumped}$	průřezová plocha sloučené výztuhy	[mm ²]
A_{sl}	průřezová plochy výztuhy	[mm ²]
A_v	plocha průřezu ve smyku	[mm ²]
$B_{p,Rd}$	odolnost šroubu v otláčení	[kN]
$C_{my} (mz)$	součinitel ekvivalentního konstantního momentu	[-]
D	ohybová tuhost 1 m širokého pásu	[Nm]
E	modul pružnosti oceli v tahu a tlaku	[kN/mm ²]
F_b	seismická smyková síla v základu	[kN]
F_d	jmenovitá únosnost lana	[kN]
$F_{b,Rd}$	únosnost šroubu v otláčení	[kN]
$F_{p,Cd}$	návrhová předpínací síla šroubu	[kN]
$F_{s,Cd}$	únosnost šroubu proti prokluzu	[kN]
$F_{t,Rd}$	únosnost šroubu v tahu	[kN]
$F_{t,Sd}$	návrhová tahová síla ve šroubu působící v interakci se smykovou silou	[kN]
$F_{t,Rd,Row}$	únosnost řady šroubů v tahu	[kN]
$F_{t,wb,Rd}$	únosnost stěny nosníku v tahu	[kN]
$F_{v,Rd}$	únosnost šroubu ve stříhu	[kN]
I_t	moment setrvačnosti v kroucení	[mm ⁴]

$I_{p,sl}$	polární moment setrvačnosti výztuhy	[mm ⁴]
$I_{sl,lumped}$	moment setrvačnosti sloučené výztuhy	[mm ⁴]
I_{st}'	moment setrvačnosti výztuhy	[mm ⁴]
$I_{t,sl}$	moment tuhosti v kroucení výztuhy	[mm ⁴]
I_w	výsečový moment setrvačnosti	[mm ⁴]
$I_y(z)$	moment setrvačnosti k ose y (z)	[mm ⁴]
$I_{y,sl}(z,sl)$	moment setrvačnosti výztuhy k ose y (z)	[mm ⁴]
K_{wt}	paramter kroucení	[-]
L_{cr}	vzpěrná délka	[mm]
$L_{eff,b}$	účinná délka T-profilu	[mm]
L_{LT}	klopící délka	[mm]
L_w	délka svaru	[mm]
M_{cr}	bezrozměrný kritický moment	[kNm]
M_{Ed}	návrhová hodnota ohybového momentu	[kNm]
M_{Rd}	návrhová hodnota únosnosti průřezu v ohybu	[kNm]
$M_{y,j,Rd}$	návrhová momentová hodnota únosnosti řady šroubů	[kNm]
N_{Ed}	návrhová hodnota normálové síly	[kN]
$N_{b,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti průřezu v tlaku	[kN]
NC	nelineární kombinace	[-]
$N_{t,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti průřezu v tahu	[kN]
R_i	reakce v podpoře ve směru osy x, y a z	[kN]
S_b	tuhost nárazníku	[kNm ⁻¹]
T	perioda	[s]
T_{Ed}	návrhová hodnota krouticího momentu	[kNm]
V	objem	[m ³]

V_{Ed}	návrhová hodnota posouvající síly	[kN]
$V_{pl,T,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti průřezu při kombinaci smykové síly a krouticího momentu	[kN]
V_{Rd}	návrhová hodnota únosnosti průřezu ve smyku	[kN]
$W_{el,y}$	pružný modul průřezu k ose y	[mm ³]
$W_{pl,y}$	plastický modul průřezu k ose y	[mm ³]
$W_{el,z}$	pružný modul průřezu k ose z	[mm ³]
$W_{pl,z}$	plastický modul průřezu k ose z	[mm ³]
W_w	modul průřezu svaru	[mm ³]
a	účinná výška svaru	[mm]
a_g	referenční zrychlená půdy	[ms ⁻²]
b	šířka profilu (průřezu)	[mm]
b_{eff}	účinná šířka desky	[mm]
d	průměr šroubu (čepu)	[mm]
d_0	vnitřní průměr hlavy šroubu (čepu)	[mm]
$e_{1,(2)}$	rozteč šroubů	[mm]
e_{om}	ekvivalentní geometrická imperfekce	[mm]
e_x, e_y, e_z	excentricita zatížení	[mm]
f	vlastní frekvence	[Hz]
f_u	mez pevnosti oceli	[kN/mm ²]
f_{ub}	mez pevnosti šroubu	[kN/mm ²]
f_{up}	mez pevnosti čepu	[kN/mm ²]
f_y	mez kluzu oceli	[kN/mm ²]
f_{yp}	charakteristická hodnota meze kluzu čepu	[kN/mm ²]
g_k	charakteristická hodnota stálého zatížení	[kN/m ²]
g_d	návrhová hodnota stálého zatížení	[kN/m ²]

h	výška profilu	[mm]
h_w	výška stěny profilu	[mm]
$i_y (z)$	poloměr setrvačnosti k ose y (z)	[mm]
k	součinitel bezpečnosti	[-]
k_g	součinitel pro trubkový spoj	[-]
k_t	redukční součinitel	[-]
$k_{t,max}$	horní limit pro redukční součinitel	[-]
$k_{yy} (zy)$	interakční součinitel při kombinaci zatížení	[-]
$m (M)$	hmotnost	[kg]
$p_{1,(2)}$	rozteč šroubů	[mm]
q	součinitel ductility	[-]
q_k	charakteristická hodnota proměnného zatížení	[kN/m ²]
q_d	návrhová hodnota proměnného zatížení	[kN/m ²]
σ_{E+}	srovnávací napětí pro vnější povrch	[kN/mm ²]
σ_{E-}	srovnávací napětí pro vnitřní povrch	[kN/mm ²]
t_f	tloušťka pásnice profilu	[mm]
t_w	tloušťka stěny profilu	[mm]
$t_{w,red}$	redukovaná tloušťka stěny profilu	[mm]
v_1	podélná rychlost pojezdu vozíku	[ms ⁻¹]
x	poloha neutrálné osy, výška tlačené oblasti	[mm]
w	hlavní výsečová plocha	[mm ²]
σ_{bottom}	napětí v dolních vláknech	[kN/mm ²]
σ_{cr}	pružné kritické napětí	[kN/mm ²]
$\sigma_{cr,c}$	pružné kritické prutové napětí	[kN/mm ²]
$\sigma_{cr,p}$	pružné kritické stěnové napětí	[kN/mm ²]

$\sigma_{cr,sl}$	pružné kritické napětí pro vybočení výztuhy	[kN/mm ²]
$\sigma_{cr,sl,lumped}$	pružné kritické napětí pro vybočení sloučené výztuhy	[kN/mm ²]
σ_{top}	napětí v horních vláknech	[kN/mm ²]
$\sigma_{p,Ed}$	napětí v hlavní trubce	[kN/mm ²]
σ_{\perp}	normálové napětí kolmé k rovině nebezpečného průřezu svaru	[kN/mm ²]
τ_{\perp}	smykové napětí kolmé k ose svaru	[kN/mm ²]
$\tau_{//}$	smykové napětí rovnoběžné s osou svaru	[kN/mm ²]
$\Phi_{y(z)}$	součinitel pro určení součinitele vzpěrnosti pro příslušné vybočení prvku	[-]
α_{cr}	kritický násobitel zatížení	[-]
α_{LT}	součinitel imperfekce	[-]
β_w	korekční faktor	[-]
γ	objemová tíha	[kN/m ³]
γ_G	dílčí součinitel spolehlivosti pro stálá zatížení	[-]
γ_s	dílčí součinitel spolehlivosti betonářské oceli	[-]
γ_{M0}	dílčí součinitel spolehlivosti materiálu - únosnost	[-]
γ_{M1}	dílčí součinitel spolehlivosti materiálu – vzpěr, klopení	[-]
γ_{M2}	dílčí součinitel spolehlivosti materiálu – spoje	[-]
γ_Q	dílčí součinitel spolehlivosti pro proměnná zatížení	[-]
δ_{max}	deformace prvku	[mm]
δ_{ser}	limitní deformace prvku	[mm]
$\bar{\lambda}_{LT}$	poměrná štíhlost při klopení	[-]
λ_y, λ_z	štíhlost prvku	[-]

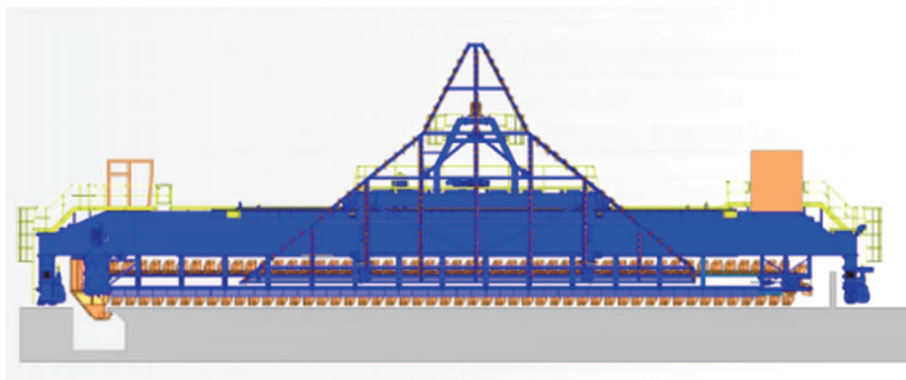
$\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$	poměrná štíhlost prvku	[-]
ξ	součinitel interakce mezi prutovým a stěnovým chováním	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ_c	součinitel boulení	[-]
χ_{LT}	součinitel klopení	[-]
$\chi_{y(z)}$	součinitel vzpěrnosti pro příslušné vybočení	[-]

1 Úvod

Boční shrnovač slouží pro rozrušování hromady borité rudy (boraxu) umístěné v kryté skladovací hale se zvýšenou prašností a teplotou pohybující se od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozpojování materiálu je realizováno pomocí rozrušovací brány, která se při rozjezdu stroje po kolejnicích s rozchodem 35 m spustí na rudu a poté dochází k jejímu rozrušování. Následně je boritá ruda odebírána pomocí příčného vyhrnovacího řetězu a sypký materiál je shrnut do mobilní výsypky stroje.

Boční shrnovač je umístěn v seizmicky aktivní oblasti Turecka, které je největším nalezištěm borité rudy na světě. Boritá ruda neboli borax (dříve také tinkal) je jednoklonný minerál, který se využívá v chemickém, potravinářském, sklářském průmyslu, ale také v zemědělství jako hnojivo.

Mezi hlavní výhody stroje lze zahrnout možnost automatického nebo manuálního řízení, samotný shrnovač nemusí být používán pouze v krytých skladovacích prostorách, ale také ve venkovním prostředí a pro skládkování různých sypkých hmot (železná ruda, uhlí, cement, sádrovec apod.). Jako další positívum stroje lze uvést, že kromě samotného rozpojování materiálu dochází k jeho promísení – homogenizaci materiálu.



Obr. 1: Schéma bočního mostového shrnovače MBSk 600 [16]

Shrnovač je schopen během hodiny zpracovat až 600 tun skladovaného boraxu, provozní výkon stroje se pohybuje od 150 do 550 tun za hodinu. Celková pojezdová dráha je 97 m dlouhá, šířka skládkového zařízení se pohybuje kolem 7 metrů. Úhel rozrušovačů lze nastavit v rozmezí 0° až 45° a rychlost pojezdu rozrušovacích bran kolísá v hodnotách od 6 do 60 m za minutu. Hmotnost celé konstrukce shrnovače se pohybuje kolem 165 tun.

V první části diplomové práce je provedeno statické posouzení jednotlivých částí shrnovače, druhá část se orientuje na analýzu

a vyhodnocení numerického modelování tenkostěnných průřezů ve statickém software Scia Engineer.



Obr. 2: Posuzovaný mostový boční shrnovač MBSk 600 ve skládkové kryté hale v Turecku [20]

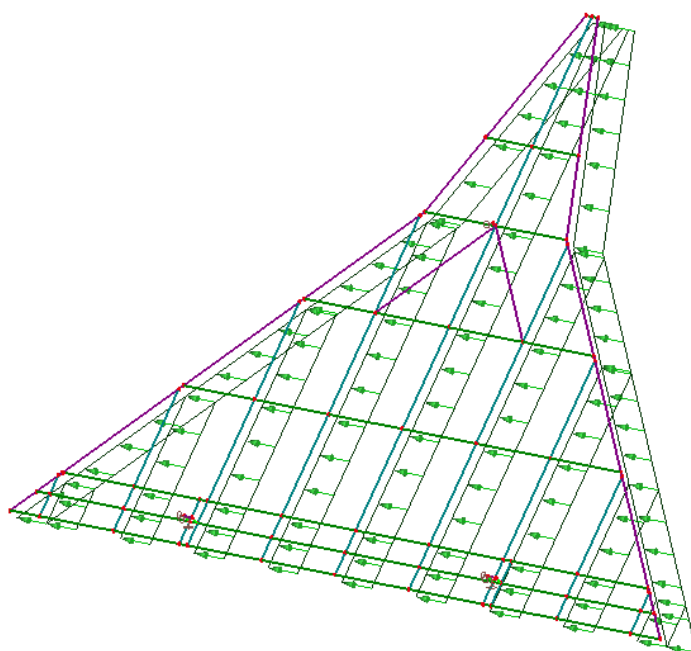
2 Návrh rozrušovací brány

Vozík MBSk600 je opatřen dvěma rozrušovacími branami, které jsou k ocelové konstrukci připojeny pomocí čepového spoje. Pro zajištění polohy brány v pracovní poloze jsou zavěšeny na lanech připojených ke konstrukci kladkostroje vozíku. Rozrušovací brána mostového nakladače slouží k rozrušování hromady borité rudy umístěné uvnitř kryté skladovací haly a k promísení a homogenizaci směsi. Po rozrušení hromady se borax postupně odebírá pomocí vyhrnovacího řetězu, který jej shrnuje do výsypky. Model rozrušovací brány je zpracován v software Scia Engineer ve dvou základních polohách. První polohou je poloha pracovní definována ve sklonu podélné osy brány 40° viz obrázek č. 3. Druhou polohou je horizontální poloha rozrušovací brány položené na borité rudě.

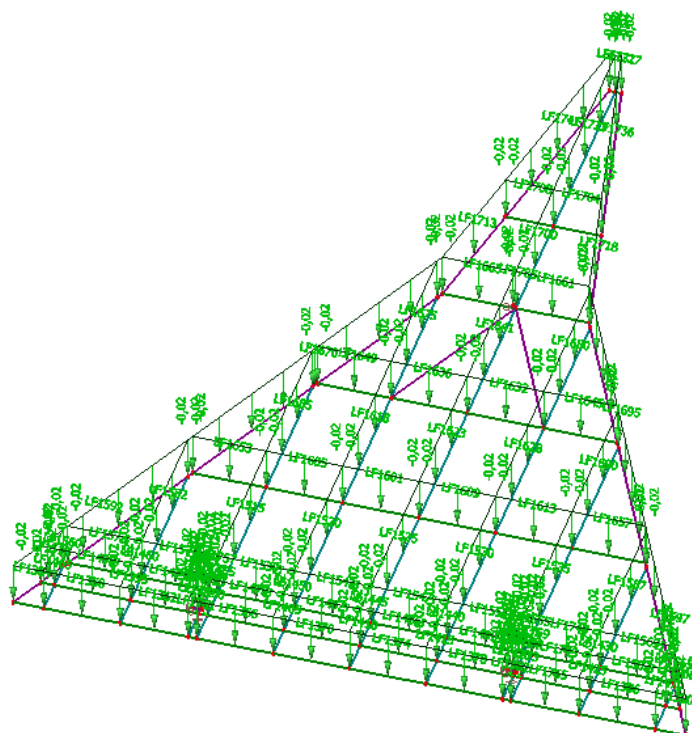
Konstrukce rozrušovače podkladu je modelována jako prutová konstrukce v obecné pracovní rovině XYZ s použitím software Scia Engineer. Je sestavena ze dvou průřezů – hlavní soustavu tvoří trubky RO159x5,0 a diagonály konstrukce jsou tvořeny trubkami RO133x5,0. Trubky RO159x5,0 jsou spojeny svařením, proto jsou v modelu veškeré spoje modelovány jako rámové tuhé. Trubky diagonál jsou navařeny koutovým oboustranným svarem na styčnickový plech v příslušném spoji a tento spoj je také modelován jako rámový. Připojení pomocí čepového spoje ke konstrukci ocelového vozíku je v modelu znázorněno pomocí kloubových podpor v tomto místě. Zavěšení pomocí lana představuje jednoduchou podporu zachycující tahové normálové síly. Hmotnost konstrukce jedné rozrušovací brány je cca 4,10 tun.

Zatížení rozrušovací brány:

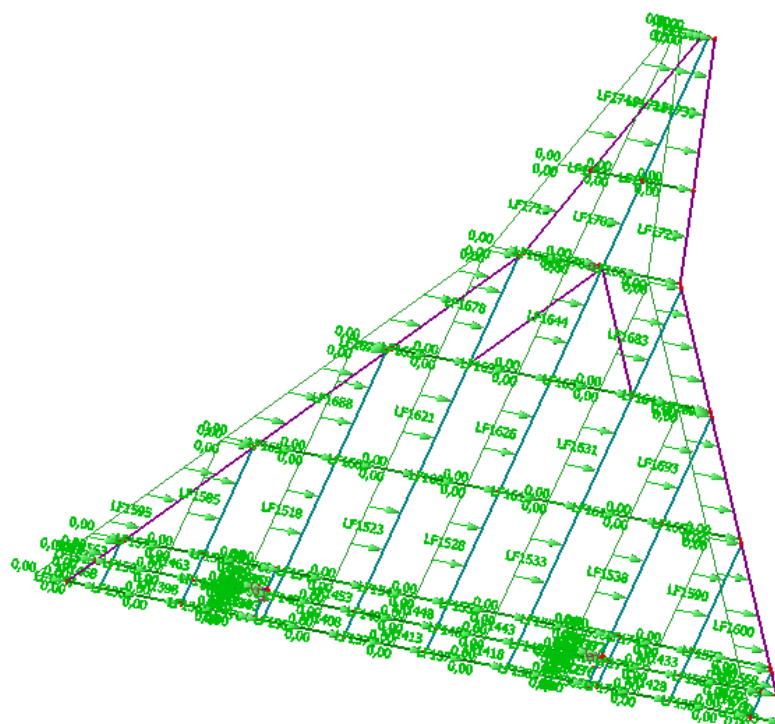
- **Vlastní tíha** - automaticky generována softwarem
- **Boční síla** způsobená rozrušováním – definováno ve výkrese, v naznačených trubkách je definována velikost zatížení 675 N/m působícího na excentricitě e_z 425 mm viz obrázek č. 5 [20]
- **Zatížení dynamické** ve svislém směru v hodnotě $\pm 0,1$ násobku vlastní tíhy konstrukce (stanoveno v souladu s normou ČSN 27 7008)
- **Zatížení dynamické** ve vodorovném směru kolmo k podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,02$ násobku vlastní tíhy konstrukce (stanoveno v souladu s normou ČSN 27 7008)



Obr. 5: Boční síla způsobená rozrušováním



Obr. 6: Zatížení dynamické ve směru osy z+



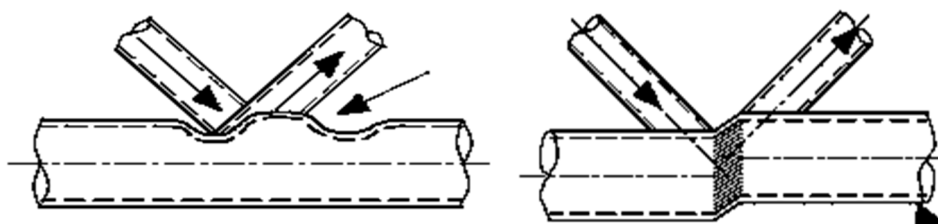
Obr. 7: Zatížení dynamické ve směru osy x+

Dle normy ČSN 27 7008 jsou hodnoty dílčích součinitelů zatížení stanoveny pro stálé zatížení 1,10, pro proměnné zatížení boční síly 1,50 a pro dynamické zatížení v hodnotě 1,00. Kombinace jsou provedeny pomocí software Scia

Engineer s použitím kombinačního pravidla dle [13] a byl proveden výpočet geometricky nelineární, což umožňuje použít v posudku vzpěru prvků systémové délky jako délky vzpěrné.

2.1 Posudek konstrukce na MSÚ

U trubkových styčníků mohou nastat mimo jiné dva základní způsoby porušení, pro které je nutné stanovit výpočtovou únosnost a to plastické porušení povrchu pásové trubky nebo průřezu pásu a porušení prolomení smykem.



Obr. 8: Způsoby porušení trubkových styčníků

V případě plastického porušení povrchu pásu o únosnosti rozhoduje dostatečná tuhost hlavní trubky, ke které se připojují další prvky, které v místě spoje namáhají prvek velkými normálovými silami avšak prvek je dostatečně tuhý a dochází pouze k plastické deformaci povrchu prvku trubkového profilu. Naopak v případě nedostatečně tuhé hlavního prvku s malou tloušťkou při namáhání normálovými silami dochází k porušení tzv. smykovým prolomením.

Zatřídění průřezu RO159x5,0 – ohyb a tlak

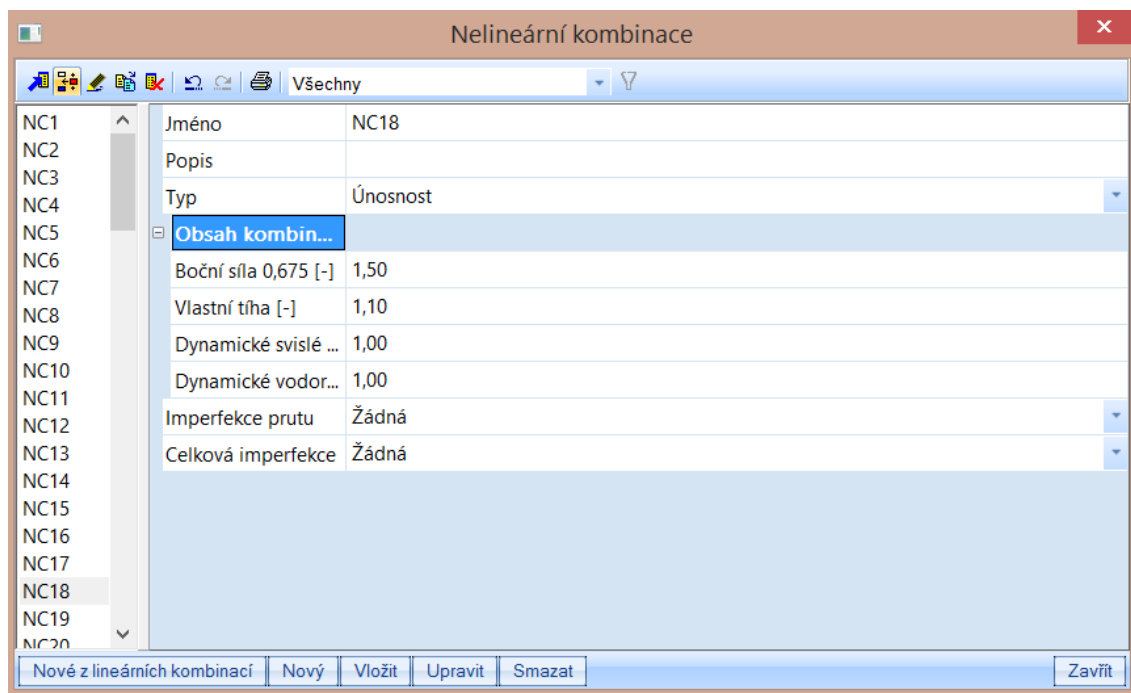
$$\frac{d}{t} = \frac{159}{5} = 31,8 \leq 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot \left(\sqrt{\frac{235}{355}} \right)^2 = 33,09 \quad \text{Splněno - třída průřezu 1}$$

Zatřídění průřezu RO133x5,0 – ohyb a tlak

$$\frac{d}{t} = \frac{133}{5} = 26,6 \leq 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot \left(\sqrt{\frac{235}{355}} \right)^2 = 33,09 \quad \text{Splněno - třída průřezu 1}$$

Ověření mezního stavu únosnosti může být založeno na výpočtu plastické únosnosti průřezu, jelikož byly splněny podmínky pro zatřídění průřezu do třídy 1. U tohoto průřezu dle klasifikace lze předpokládat plnou plastickou únosnost avšak omezenou deformační kapacitu.

Ve většině posudků rozhoduje nelineární kombinace NC18:

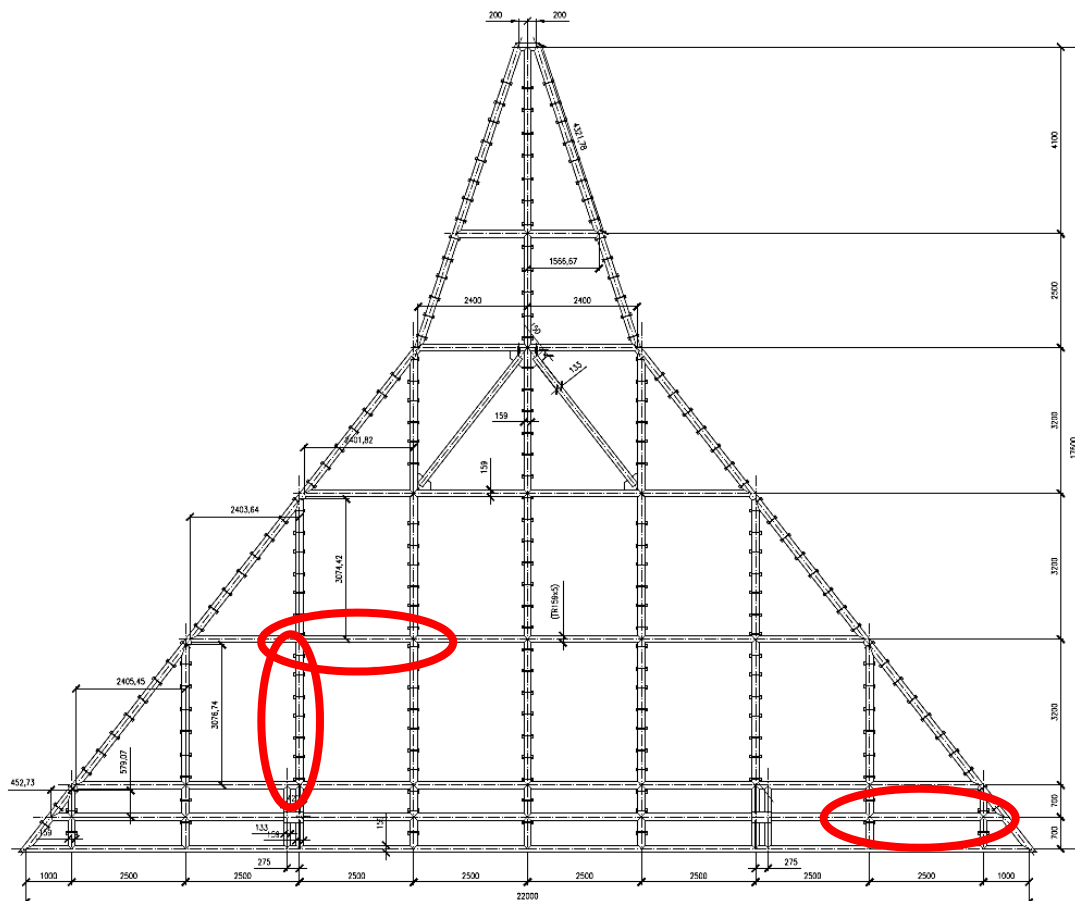


Obr. 9: Obsah nelineární kombinace (výstup ze software Scia Engineer)

Rozhodující kombinace obsahuje vlastní tíhu, účinek boční síly a také dynamické účinky stanovené v souladu s ČSN 27 7008 s příslušnými součiniteli zatížení odpovídajícím posouzení konstrukce na mezní stav únosnosti.

Posudek na kombinaci normálové síly (tlak) a ohybového momentu RO159x5,0

Posouzeny jsou prvky s maximálními vnitřními silami stanovenými s použitím software Scia Engineer, které jsou zobrazeny na obrázku č. 10. Prvky jsou profilu RO159x5 a posudek je proveden na vzpěrnou únosnost, kdy se vzpěrné délky uvažují jako délky systémové vzhledem k aplikované geometricky nelineární statické analýze, a na kombinaci ohybu a normálové síly. Při kombinaci ohybového momentu a tlakové normálové síly jsou uvažovány kombinace s maximálními ohybovými momenty v jednotlivých směrech s příslušnými vnitřními silami a kombinace s maximální tlakovou silou a příslušnými ohybovými momenty.



Obr. 10: Posuzované pruty rozrušovací brány

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC18

$$N_{Ed,max} = -69,14 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y,př} = -7,14 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z,př} = 4,32 \text{ kNm}$$

2. NC18

$$N_{Ed,př} = -29,50 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y,max} = -8,26 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z,př} = 0,00 \text{ kNm}$$

3. NC20

$$N_{Ed,př} = -1,56 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y,př} = -1,87 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z,max} = -15,60 \text{ kNm}$$

Kombinace NC18 vyvoluje maximální tlakovou normálovou sílu na modelu v pracovní poloze. V kombinaci NC18 vzniká také maximální hodnota ohybového momentu M_y a M_z v případě použití modelu v horizontální poloze.

Průřezové charakteristiky profilu RO159x5,0

$$A = 2,419 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 119 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y = i_z = 54,00 \text{ mm}$$

$$I_y = I_z = 7,18 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 14,4 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

1. Kombinace NC18 – maximální tlaková síla

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 2225 \text{ mm}$$

Výpočet vzpěru kolmo k ose z-z a y-y

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2225}{54,0} = 41,20$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{41,20}{76,40} = 0,539 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } a \quad \alpha = 0,21$$

** Průřez dutý válcovaný za tepla.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,539 - 0,2) + 0,539^2] = 0,681$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,681 + \sqrt{0,681^2 - 0,539^2}} = 0,911$$

Výpočet klopení

Klopení u těchto prvků nenastává, jedná se o dutý průřez.

Posudek na kombinaci normálové síly a ohybového momentu

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,419 \cdot 10^3 \cdot 355 = 858,75 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 119 \cdot 355 = 42,245 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 119 \cdot 355 = 42,245 \text{ kNm}$$

$$\dots \text{ konzervativně } \psi = 1,00$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

Hodnoty interakčních součinitelů při kombinaci namáhání tlakovou normálovou silou a ohybovými momenty v případě profilu nepodléhajícímu kroucení jsou stanoveny pomocí software vytvořeného v MS Excel.

$$k_{yy} = 1,03$$

$$k_{zz} = 1,03$$

$$k_{yz} = 0,621$$

$$k_{zy} = 0,621$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & \frac{69,14}{0,911 \cdot 858,75} + 1,03 \frac{7,14}{1,0 \cdot 42,245} + 0,621 \frac{4,32}{1,0 \cdot 42,245} = 0,10 + 0,201 + 0,073 = \\ & = 0,376 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & \frac{69,14}{0,911 \cdot 858,75} + 0,621 \frac{7,14}{1,0 \cdot 42,245} + 1,03 \frac{4,32}{1,0 \cdot 42,245} = 0,10 + 0,121 + 0,122 = \\ & = 0,344 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{69,14}{1,15} + \frac{7,14}{1,15} + \frac{4,32}{1,15} = 0,093 + 0,194 + 0,118 = 0,405 \leq 1,0$$

Průřez RO159x5 vyhovuje.

2. Kombinace NC18 – maximální ohybový moment M_y

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 3200 \text{ mm}$$

Výpočet vzpěru kolmo k ose y-y a z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{3200}{54,0} = 59,26$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{59,26}{76,40} = 0,776 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } a \quad \alpha = 0,21$$

** Průřez dutý válcovaný za tepla.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,776 - 0,2) + 0,776^2] = 0,862$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,862 + \sqrt{0,862^2 - 0,776^2}} = 0,808$$

$$k_{yy} = 1,07$$

$$k_{zz} = 1,07$$

$$k_{yz} = 0,640$$

$$k_{zy} = 0,640$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{29,50}{0,808 \cdot 1,15} + 1,07 \frac{8,26}{1,0 \cdot 1,15} + 0,640 \frac{0,00}{1,0 \cdot 1,15} = 0,049 + 0,231 = \\ & = 0,280 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{29,80}{858,75} + \frac{8,26}{42,245} + \frac{0,00}{42,245} =$$

$$\frac{1}{\gamma_{M1}} + \frac{1}{\gamma_{M1}} + \frac{1}{\gamma_{M1}} = \frac{1}{1,15} + \frac{1}{1,15} + \frac{1}{1,15} =$$

$$= 0,040 + 0,225 = 0,264 \leq 1,0$$

Průřez RO159x5 vyhovuje.

3. Kombinace NC20 – maximální ohybový moment M_z

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 2500 \text{ mm}$$

Výpočet vzpěru kolmo k ose y-y a z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2500}{54,0} = 46,30$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{46,30}{76,40} = 0,606 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } a \quad \alpha = 0,21$$

* Průřez dutý válcovaný za tepla.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,606 - 0,2) + 0,606^2] = 0,726$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,726 + \sqrt{0,726^2 - 0,606^2}} = 0,888$$

$$k_{yy} = 1,02$$

$$k_{zz} = 1,02$$

$$k_{yz} = 0,611$$

$$k_{zy} = 0,611$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$\frac{1,56}{0,888 \cdot 858,75} + 1,02 \frac{1,87}{1,0 \cdot 42,24} + 0,611 \frac{15,60}{1,0 \cdot 42,245} = 0,002 + 0,05 + 0,255$$

$$= 0,308 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{1,56}{\frac{0,888 \cdot 858,75}{1,15}} + 0,611 \frac{1,87}{\frac{1,0 \cdot 42,24}{1,15}} + 1,02 \frac{15,60}{\frac{1,0 \cdot 42,245}{1,15}} = 0,002 + 0,031 + 0,425$$

$$= 0,458 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \frac{1,56}{\frac{858,75}{1,15}} + \frac{1,87}{\frac{42,245}{1,15}} + \frac{15,60}{\frac{42,245}{1,15}} =$$

$$= 0,003 + 0,051 + 0,425 = 0,479 \leq 1,0$$

Průřez RO159x5 vyhovuje.

Posudek na smyk

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

$$V_{yEd,max} = 67,96 \text{ kN}$$

Smyková plocha (dle ČSN EN 1993-1-1 6.2.6):

$$A = 2,419 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$A_v = \frac{2A}{\pi} = \frac{2 \cdot 2,419 \cdot 10^3}{\pi} = 1,540 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,540 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 274,47 \text{ kN}$$

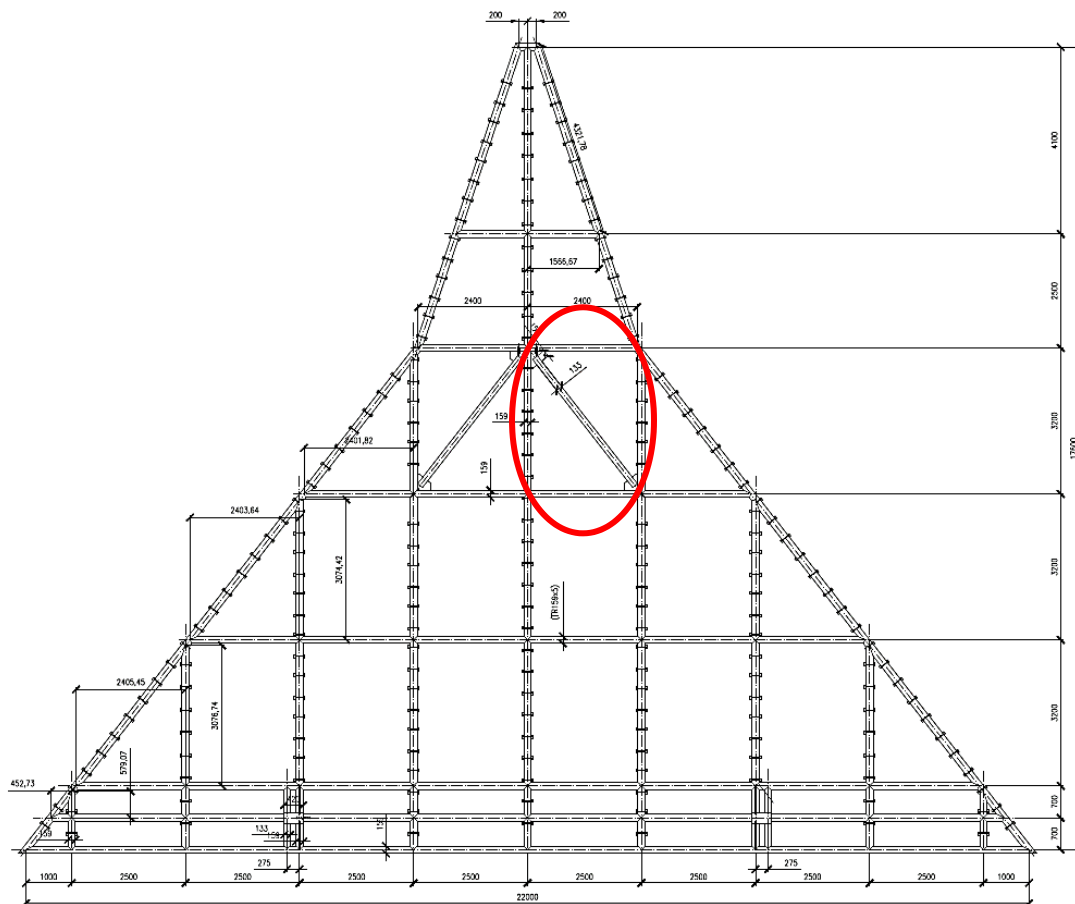
$$V_{pl,Rd} = 274,47 \text{ kN} \geq V_{yEd,max} = 67,96 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 274,47 \text{ kN} \geq 2 \cdot V_{yEd,max} = 135,92 \text{ kN}$$

Průřez RO159x5 vyhovuje.

Posudek diagonály RO133x5

Diagonála profilu RO133x5 je posouzena na vzpěrnou únosnost, únosnost při kombinaci ohybového a osového namáhání.



Obr. 11: Posuzovaná diagonála rozrušovací brány

Průřezové charakteristiky profilu RO133x5,0

$$A = 2,01 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 82 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y = i_z = 45,30 \text{ mm}$$

$$I_y = I_z = 4,12 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_t = 8,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

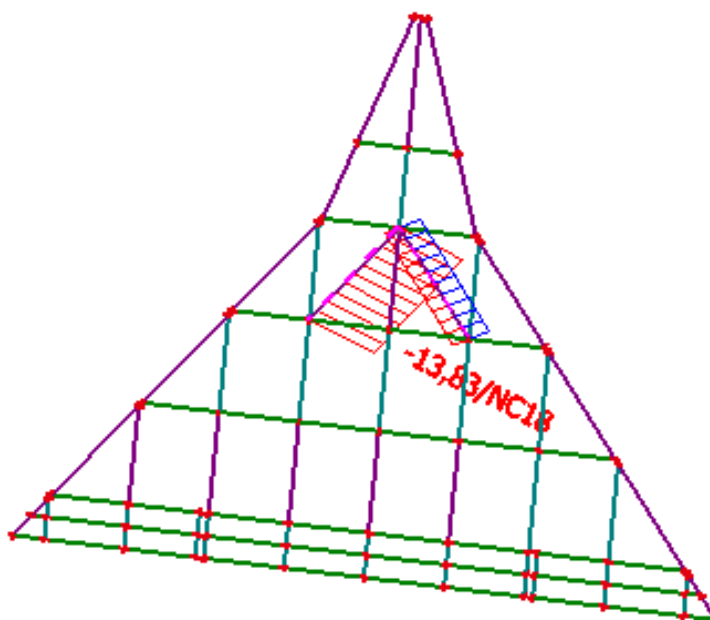
1. NC18

$$N_{Ed,max} = -13,83 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y,př} = -2,34 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z,př} = 0,00 \text{ kNm}$$

Kombinace NC18 vyvoluje maximální normálovou sílu na modelu v pracovní poloze. Vzhledem k velikosti ohybových momentů bude rozhodující právě kombinace s maximální normálovou tlakovou silou a příslušnými ohybovými momenty.



Obr. 12: Normálová síla v diagonále (výstup ze software Scia Engineer)

Kombinace NC18

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 4061 \text{ mm}$$

Výpočet vzpěru kolmo k ose y-y a z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{4061}{45,30} = 89,65$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{89,65}{76,40} = 1,173 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } a \quad \alpha = 0,21$$

* Průřez dutý válcovaný za tepla.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (1,173 - 0,2) + 1,173^2] = 1,290$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,290 + \sqrt{1,290^2 - 1,173^2}} = 0,547$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,01 \cdot 10^3 \cdot 355 = 713,55 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 82 \cdot 355 = 29,110 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 82 \cdot 355 = 29,110 \text{ kNm}$$

$$k_{yy} = 1,04$$

$$k_{zz} = 1,04$$

$$k_{yz} = 0,624$$

$$k_{zy} = 0,624$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{13,83}{0,547 \cdot 713,55} + 1,04 \frac{2,34}{1,0 \cdot 29,110} + 0,624 \frac{0}{1,0 \cdot 29,110} = 0,041 + 0,096 = \\ & = 0,137 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{13,83}{713,55} + \frac{2,34}{29,110} + \frac{0,00}{29,110} = \\ & = 0,041 + 0,092 = 0,115 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Průřez RO133x5 vyhovuje.

2.2 Posudek na MSP

Svislý průhyb

Posudek svislého průhybu je proveden pro stav od všech působících proměnných sil (včetně dynamických sil od provozního kmitání). Výpočet je proveden pro charakteristické hodnoty zatížení. Pro posudek svislého průhybu

rozhoduje kombinace NC83 obsahující zatížení boční silou od provozu a dynamických účinků se součinitelem $Y_{M,ser}$ v hodnotě 1,00.

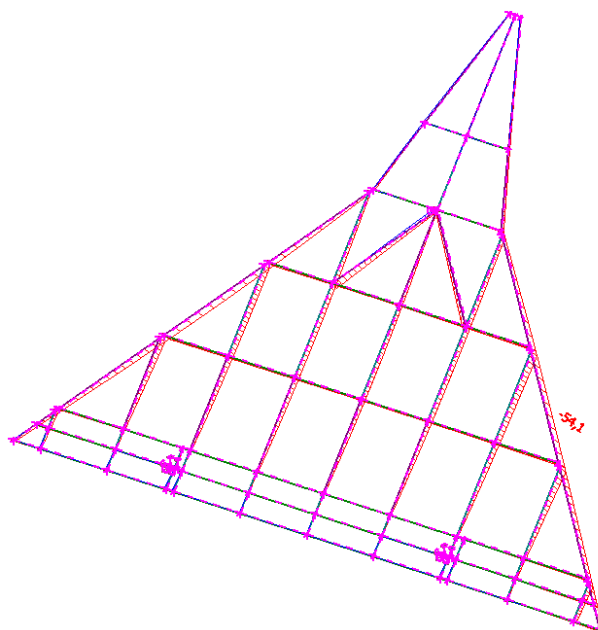
$$l = 13963 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 54,10 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{200} = \frac{13963}{200} = 69,82 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 69,82 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 54,10 \text{ mm}$$

Svislý průhyb vyhovuje.



Obr. 13: Svislý průhyb konstrukce rozrušovače

Vodorovný průhyb

Posudek vodorovného průhybu je proveden pro stav od všech působících sil proměnných (včetně dynamických sil od provozního kmitání). Výpočet je proveden pro charakteristické hodnoty zatížení.

Pro posudek svislého průhybu rozhoduje kombinace NC81 obsahující zatížení vlastní tíhou, boční silou od provozu a dynamických účinků se součinitelem $Y_{M,ser}$ v hodnotě 1,00.

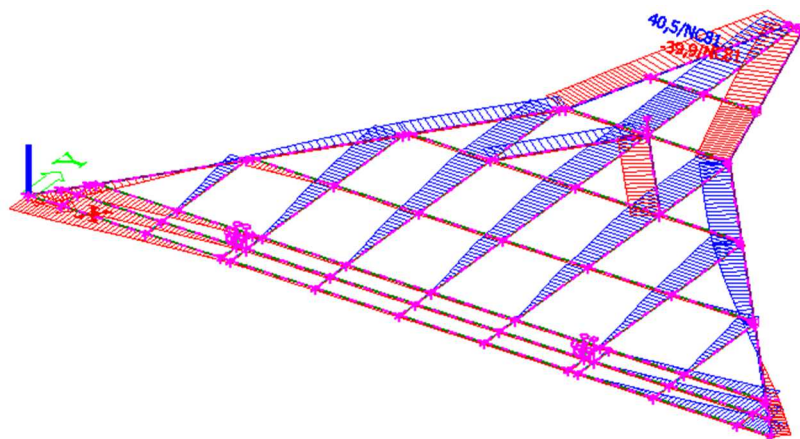
$$l = 16900 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 40,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{200} = \frac{16900}{200} = 67,60 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 67,60 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 40,50 \text{ mm}$$

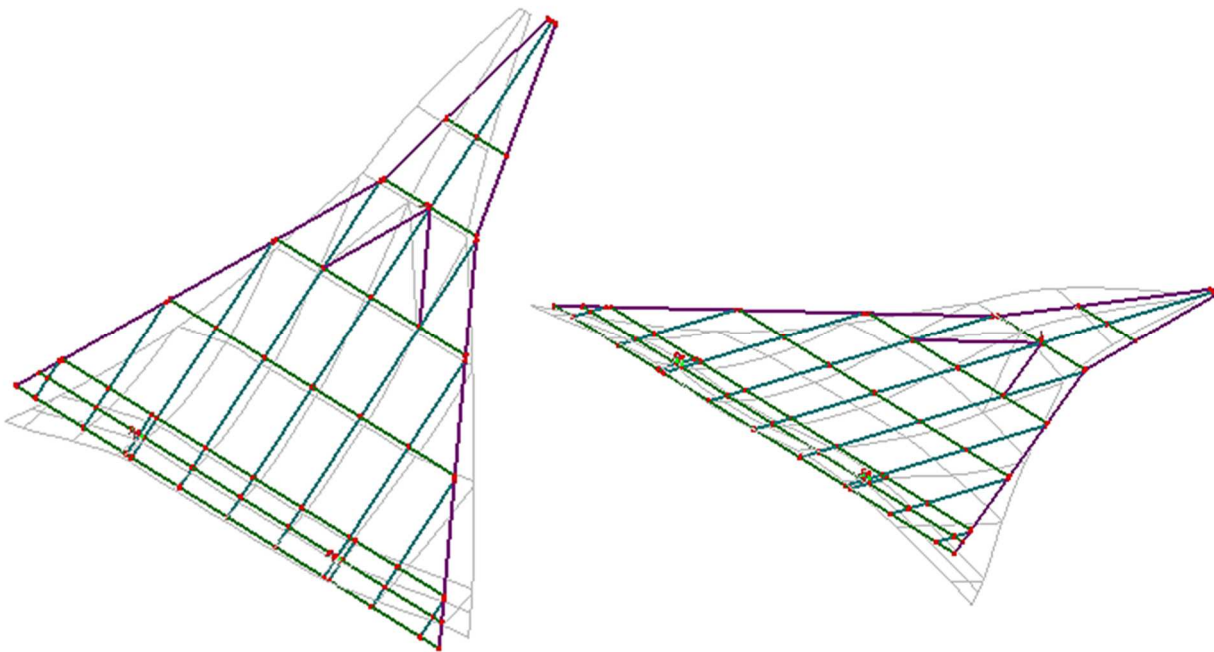
Vodorovný průhyb vyhovuje.



Obr. 14: Vodorovný průhyb konstrukce rozrušovače

Dynamické účinky

Dynamické účinky jsou již zahrnuty v kombinacích pomocí dynamického součinitele.



Obr. 15: Výstup ze software Scia Engineer – tvar 3D deformované konstrukce (vlevo brána v pracovní poloze, vpravo v horizontální poloze)

2.3 Posudek styčníků

Na základě statické analýzy rozrušovací brány v software Scia Engineer byly vybrány nejvíce namáhané styčníky v zastoupení pro jednotlivé typy svařovaných styčníků a ty následně posouzeny. Posudky jsou zobrazeny v následující části diplomové práce.

2.3.1 Posudek svařovaného styčníku: Y-styčník

V souladu s ČSN EN 1993-1-8 musí být splněny následující podmínky k možnosti použití vztahů pro stanovení výpočtové únosnosti trubkových styčníků:

- a) Není-li jmenovitá mez kluzu větší než 355 MPa, nemusí se únosnost redukovat součinitelem 0,9. **Podmínka je splněna.**

- b) Jmenovitá tloušťka stěny je větší než 2,5 mm a menší než 25 mm.
Jmenovitá tloušťka průřezu je 5 mm. **Podmínka je splněna.**

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

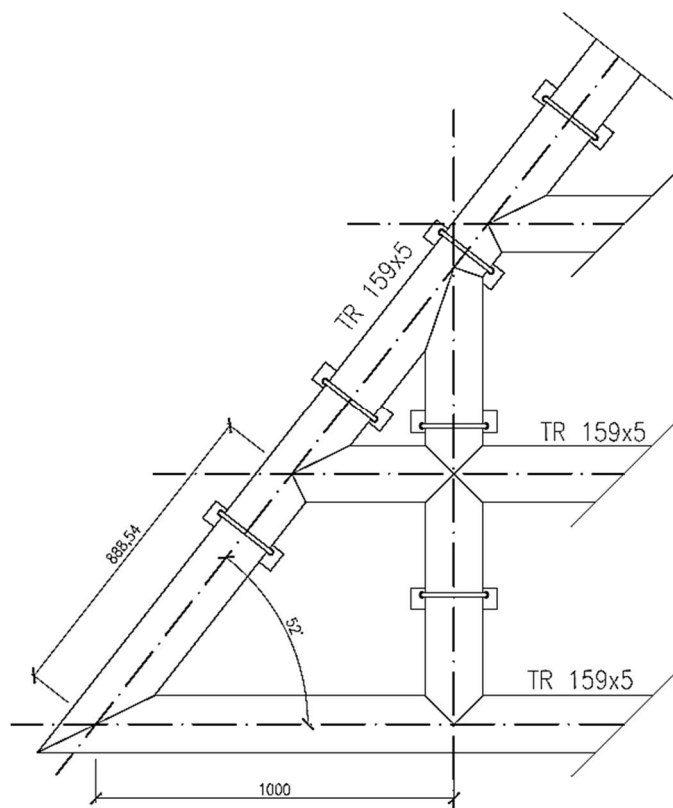
$$N_{i,Ed,max} = 4,45 \text{ kN}$$

$$M_{i,Ed,y,max} = 0,53 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = -4,22 \text{ kN}$$

$$M_{0,Ed,y,max} = 0,52 \text{ kNm}$$

Z důvodu malých ohybových momentů v daném styčníku je posudek proveden pouze pro osovou únosnost styčníku.



Obr. 16: Y-styčník

Konstrukční požadavky

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} = \frac{159}{5} = 31,80 \leq 50$$

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{159}{2 \cdot 5} = 15,90$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5g}{t_0} - 1,33\right)} \right) = 15,90^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot 15,90^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5 \cdot 0}{5} - 1,33\right)} \right) = 1,80$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 4,22 - 4,45 \cdot \cos(52^\circ) = 1,48 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{1480}{2,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,52 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} = 4,981 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{4,981}{355} = 0,014 \geq 0,00$$

$$k_p = 1,00 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1,0 - 0,3 \cdot 0,014(1 + 0,014) = 0,99 \cong 1,00$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2 \cdot \beta^2)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{15,9^{0,2} \cdot 1,0 \cdot 355 \cdot 5^2}{\sin 52} (2,8 + 14,2 \cdot 1,0^2)}{1,0} = 332,94 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$N_{1,Rd} = 332,94 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 4,45 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na plastické porušení povrchu pásu.

Porušení prolomením smykem

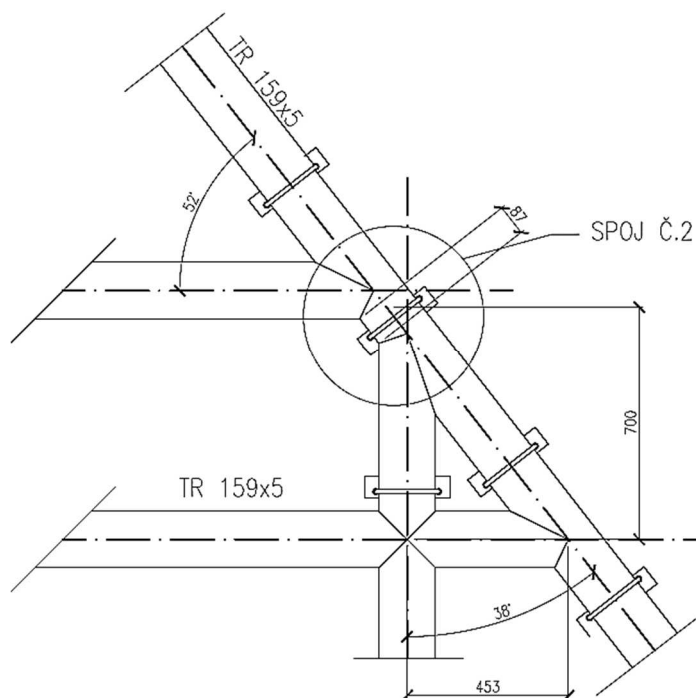
$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355}{\sqrt{3}} 5 \cdot \pi \cdot 159 \frac{1 + \sin(52^\circ)}{2 \sin^2(52^\circ)}}{1,00} = 736,99 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 736,99 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 4,45 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na porušení prolomením smykem.

2.3.2 Posudek svařovaného styčnicku: K-styčnick

K styčnick je tvořený napojením profilů na jeden hlavní průběžný profil s typickým ponecháním distance mezi připojovanými profily. Styčnick se posuzuje s ohledem na možné porušení povrchu pásu, anebo prolomení smykem. Geometrie styčnicku je znázorněna na obrázku č. 17.



Obr. 17: K-styčnick

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

$$N_{1,Ed,max} = -38,00 \text{ kN}$$

$$M_{1,Ed,y,př} = 1,69 \text{ kNm}$$

$$M_{1,Ed,z,př} = 6,49 \text{ kNm}$$

$$N_{2,Ed,max} = 15,12 \text{ kN}$$

$$M_{2,Ed,y,př} = 0,59 \text{ kNm}$$

$$M_{2,Ed,z,př} = 4,39 \text{ kNm}$$

$$N_{3,Ed,max} = 30,63 \text{ kN}$$

$$M_{3,Ed,y,př} = 0,83 \text{ kNm}$$

$$M_{2,Ed,z,max} = 10,82 \text{ kNm}$$

Konstrukční požadavky

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} = \frac{159}{5} = 31,80 \leq 50$$

$$g = t_1 + t_2$$

$$87,36 \text{ mm} \geq 5 + 5 = 10 \text{ mm}$$

Podmínka je splněna.

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{159}{2 \cdot 5} = 15,90$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$\begin{aligned} k_g &= \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5g}{t_0} - 1,33\right)} \right) = \\ &= 15,90^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot 15,90^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5 \cdot 87,36}{5} - 1,33\right)} \right) = 1,74 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{p,Ed} &= N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 30,63 - 38 \cdot \cos(52^\circ) - 15,12 \cdot \cos(38^\circ) = \\ &= -4,68 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{-4680}{2,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{10,82 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} + \frac{0,83 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} = 95,97 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{95,97}{355} = 0,270 \geq 0,00$$

$$k_p = 1,00 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1,0 - 0,3 \cdot 0,270(1 + 0,270) = 0,89$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{d_1 + d_2}{2d_0} \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{1,74 \cdot 0,89 \cdot 355 \cdot 5^2}{\sin(52^\circ)} \left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{159 + 159}{2 \cdot 159} \right)}{1,0} = 209,29 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$N_{1,Ed} \cdot \sin \theta_1 + N_{2,Ed} \cdot \sin \theta_2 \leq N_{2,Rd} \cdot \sin \theta_1$$

$$38,00 \cdot \sin(52^\circ) + 15,12 \cdot \sin(38^\circ) \leq 209,29 \cdot \sin(38^\circ)$$

$$39,25 \text{ kN} \leq 128,85 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na plastické porušení povrchu pásu.

Porušení prolomením smykem

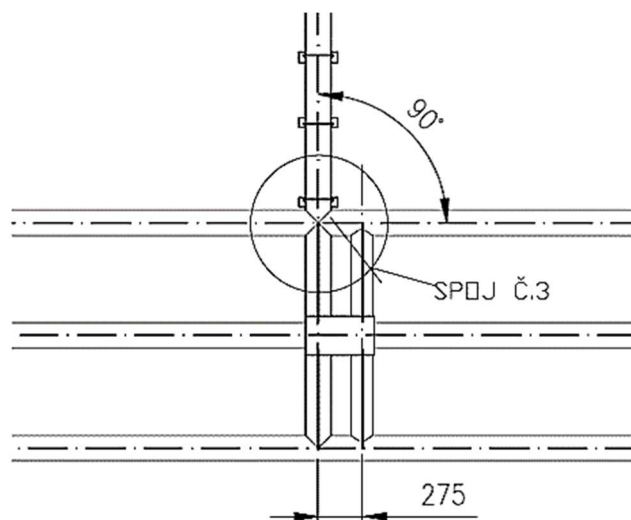
$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355}{\sqrt{3}} 5 \cdot \pi \cdot 159 \frac{1 + \sin(52^\circ)}{2 \sin^2(52^\circ)}}{1,00} = 736,99 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 736,99 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 38,00 \text{ kN}$$

Druhý prut na namáhání smykem jistě vyhoví.

2.3.3 Posudek svařovaného styčnicku: X-styčník

Styčník označovaný jako X styčník je charakteristický křížením dvou profilů. Obdobně jako u styčnicku K i pro tento typ může nastat porušení povrchu pásu prutu nebo porušení prolomením smykem.



Obr. 18: X-styčník

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

$$N_{1,Ed,max} = 57,18 \text{ kN}$$

$$M_{1,Ed,y,př} = 6,00 \text{ kNm}$$

$$M_{1,Ed,z,př} = 11,94 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = 50,81 \text{ kN}$$

$$M_{0,Ed,y,př} = 4,28 \text{ kNm}$$

$$M_{0,Ed,z,př} = 7,79 \text{ kNm}$$

1. Maximální normálová síla + příslušné ohybové momenty

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{159}{2 \cdot 5} = 15,90$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 50,81 - 57,18 \cdot \cos(90^\circ) = 50,81 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{50810}{2,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{7,79 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} + \frac{4,28 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} = 122,42 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{122,42}{355} = 0,345 \geq 0,00$$

$$k_p = 1,00 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1,0 - 0,3 \cdot 0,345(1 + 0,345) = 0,861$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} 5,2}{\gamma_{M5} \cdot (1 - 0,81\beta)} = \frac{\frac{1,00 \cdot 0,861 \cdot 355 \cdot 5^2}{\sin(90^\circ)} 5,2}{1,00 \cdot (1 - 0,81 \cdot 1,0)} = 209,132 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 209,132 \text{ kN} \geq N_{1,Ed} = 57,18 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{4,85 \frac{f_{yo} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \sqrt{\gamma} \beta \cdot k_p}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{4,85 \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159}{\sin(90^\circ)} \sqrt{15,9} \cdot 1,00 \cdot 0,861}{1,00} = 23,496 \text{ kNm}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{op,1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \frac{2,7 \cdot k_p}{(1 - 0,81\beta)}}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{355 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159 \cdot 10^6}{\sin(90^\circ)} \frac{2,7 \cdot 0,861}{(1 - 0,81 \cdot 1,0)}}{1,00} = 17,265 \text{ kNm}$$

Posudek na kombinaci ohybu a osově síly

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[\frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} \right]^2 + \frac{M_{op,1,Ed}}{M_{op,1,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{57,18}{209,132} + \left[\frac{11,94}{23,496} \right]^2 + \frac{6,00}{17,265} \leq 1,0$$

$$0,273 + 0,260 + 0,348 = 0,881 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci normálové síly a ohybového momentu.

Porušení prolomením smykem

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355}{\sqrt{3}} 5 \cdot \pi \cdot 159 \frac{1 + \sin(90^\circ)}{2 \sin^2(90^\circ)}}{1,00} = 511,89 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 511,89 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 57,18 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na porušení prolomením smykem.

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

$$N_{1,Ed,max} = 29,50 \text{ kN}$$

$$M_{1,Ed,y,př} = 10,52 \text{ kNm}$$

$$M_{1,Ed,z,př} = 11,94 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = 48,64 \text{ kN}$$

$$M_{0,Ed,y,př} = 1,26 \text{ kNm}$$

$$M_{0,Ed,z,př} = 12,79 \text{ kNm}$$

1. Maximální ohybový moment + příslušné vnitřní síly

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{159}{2 \cdot 5} = 15,90$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 48,64 - 29,50 \cdot \cos(90^\circ) = 48,64 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{48640}{2,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{12,79 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,26 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} = 138,166 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{138,166}{355} = 0,389 \geq 0,00$$

$$k_p = 1,00 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1,00 - 0,3 \cdot 0,389(1 + 0,389) = 0,838$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} 5,2}{\gamma_{M5} \cdot (1 - 0,81\beta)} = \frac{\frac{1,00 \cdot 0,838 \cdot 355 \cdot 5^2}{\sin(90^\circ)} 5,2}{1,00 \cdot (1 - 0,81 \cdot 1,0)} = 203,54 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 238,28 \text{ kN} \geq N_{1,Ed} = 29,50 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{4,85 \frac{f_{yo} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \sqrt{\gamma} \beta \cdot k_p}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{4,85 \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159}{\sin(90^\circ)} \sqrt{15,9} \cdot 1,00 \cdot 0,838}{1,00} = 22,869 \text{ kNm}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{op,1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \frac{2,7 \cdot k_p}{(1 - 0,81\beta)}}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{355 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159 \cdot 10^6}{\sin(90^\circ)} \frac{2,7 \cdot 0,838}{(1 - 0,81 \cdot 1,0)}}{1,00} = 16,80 \text{ kNm}$$

Posudek na kombinaci ohybu a osově síly

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[\frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} \right]^2 + \frac{M_{op,1,Ed}}{M_{op,1,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{29,50}{203,54} + \left[\frac{11,94}{22,869} \right]^2 + \frac{10,52}{16,800} \leq 1,0$$

$$0,145 + 0,273 + 0,626 = 1,04 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci normálové síly a ohybového momentu.

Porušení prolomením smykem

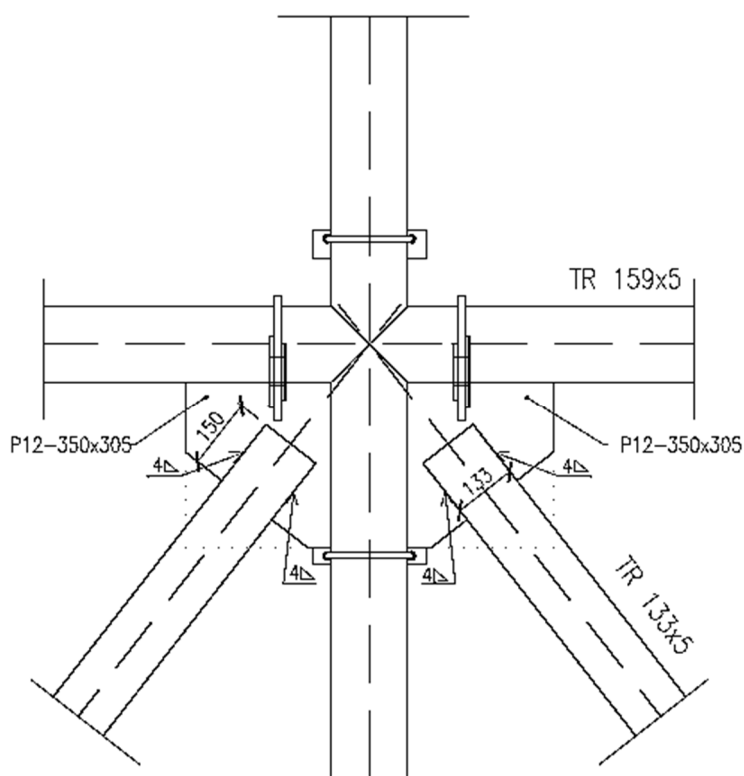
$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355}{\sqrt{3}} 5 \cdot \pi \cdot 159 \frac{1 + \sin(90^\circ)}{2 \sin^2(90^\circ)}}{1,00} = 511,89 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 511,89 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 29,50 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na porušení prolomením smykem.

2.3.4 Posudek svarového připoje diagonály

Připojení diagonály rozrušovací brány je realizováno pomocí navaření profilu RO133x5 na styčníkový plech pomocí oboustranného koutového svaru. Je navržen koutový svar s účinnou výškou 4 mm a účinnou délkou 150 mm. Svar je realizován z obou stran styčníkového plechu s tloušťkou 12 mm.



Obr. 19: Svarový připoj diagonály pomocí styčníkového plechu

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC180

$$N_{Ed,max} = 13,83 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed,př} = 1,01 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed,př} = 2,62 \text{ kNm}$$

Návrh svaru

$$a = 4 \text{ mm}$$

$$L_w = 150 \text{ mm}$$

$$A = 150 \cdot 4 = 600 \text{ mm}^2$$

$$W_y = \frac{1}{6} a \cdot L_w^2 = \frac{1}{6} 4 \cdot 150^2 = 15000 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{N_{Ed}}{4A} = \frac{13830}{4 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 5,763 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w = \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot \frac{h}{2}}{4 \cdot W_y} = \frac{2620 + 13830 \cdot 0,0665}{4 \cdot 15000 \cdot 10^{-9}} = 58,99 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = 41,71 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání

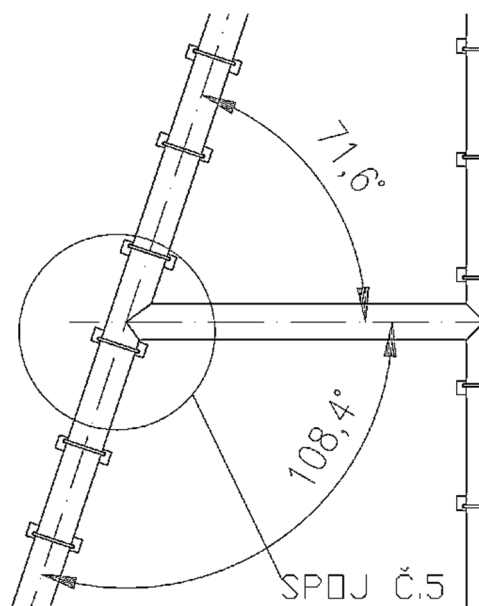
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{41,71^2 + 3 \cdot (41,71^2 + 5,763^2)} = 84,02 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,25} = 453,33 \text{ MPa}$$

Svarový přípoj vyhovuje.

2.3.5 Posudek svařovaného styčnicku: Y-styčnick

Také styčnick typu Y se může porušit v místě povrchu pásu, případně může nastat porušení vlivem usmýknutí připojovaného prutu.



Obr. 20: Y-styčnick

Vnitřní síly (ze software Scia Engineer 2015)

1. NC18

$$N_{0,Ed,max} = 0,38 \text{ kN}$$

$$M_{0,y,Ed,max} = 1,54 \text{ kNm}$$

$$M_{0,z,Ed,max} = 4,76 \text{ kNm}$$

$$N_{i,Ed,max} = -8,47 \text{ kN}$$

$$M_{i,y,Ed,max} = 6,20 \text{ kNm}$$

$$M_{i,z,Ed,max} = 2,79 \text{ kNm}$$

Konstrukční požadavky

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} = \frac{159}{5} = 31,8 \leq 50$$

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{159}{2 \cdot 5} = 15,9$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{159}{159} = 1,00$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5g}{t_0} - 1,33\right)} \right) = 15,90^{0,2} \left(1 + \frac{0,0024 \cdot 15,90^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5 \cdot 0}{5} - 1,33\right)} \right) = 1,80$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 8,47 - 0,38 \cdot \cos(71,6^\circ) = 8,35 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{8350}{2,42 \cdot 10^{-3}} + \frac{6,20 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} + \frac{2,79 \cdot 10^3}{119 \cdot 10^{-6}} = 78,99 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{78,99}{355} = 0,223 \geq 0,00$$

$$k_p = 1,00 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1,0 - 0,3 \cdot 0,223(1 + 0,223) = 0,92 \cong 1,00$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y,0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2 \cdot \beta^2)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{15,9^{0,2} \cdot 1,0 \cdot 355 \cdot 5^2}{\sin(71,6^\circ)} (2,8 + 14,2 \cdot 1,0^2)}{1,0} = 276,49 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$N_{1,Rd} = 276,49 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 0,38 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na plastické porušení povrchu pásu.

Porušení prolomením smykem

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355}{\sqrt{3}} 5 \cdot \pi \cdot 159 \frac{1 + \sin(71,60^\circ)}{2 \sin^2(71,60^\circ)}}{1,00} = 554,013 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 554,013 \text{ kN} \geq N_{i,Ed} = 0,38 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na porušení prolomením smykem.

Návrhová momentová únosnost

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{4,85 \frac{f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \sqrt{\gamma} \beta \cdot k_p}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{4,85 \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159}{\sin(71,60^\circ)} \sqrt{15,9} \cdot 1,00 \cdot 1,00}{1,00} = 28,76 \text{ kNm}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{op,1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin \theta_1} \frac{2,7 \cdot k_p}{(1 - 0,81\beta)}}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{4,85 \frac{355 \cdot 0,005^2 \cdot 0,159 \cdot 10^6}{\sin(71,60^\circ)} \frac{2,7 \cdot 1,0}{(1 - 0,81 \cdot 1,0)}}{1,00} = 21,133 \text{ kNm}$$

Posudek na kombinaci ohybu a osově síly

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[\frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} \right]^2 + \frac{M_{op,1,Ed}}{M_{op,1,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{0,38}{276,49} + \left[\frac{4,76}{28,760} \right]^2 + \frac{1,54}{21,133} \leq 1,0$$

$$0,002 + 0,027 + 0,073 = 0,102 \leq 1,0$$

Styčnický vyhovuje na kombinaci normálové síly a ohybového momentu.

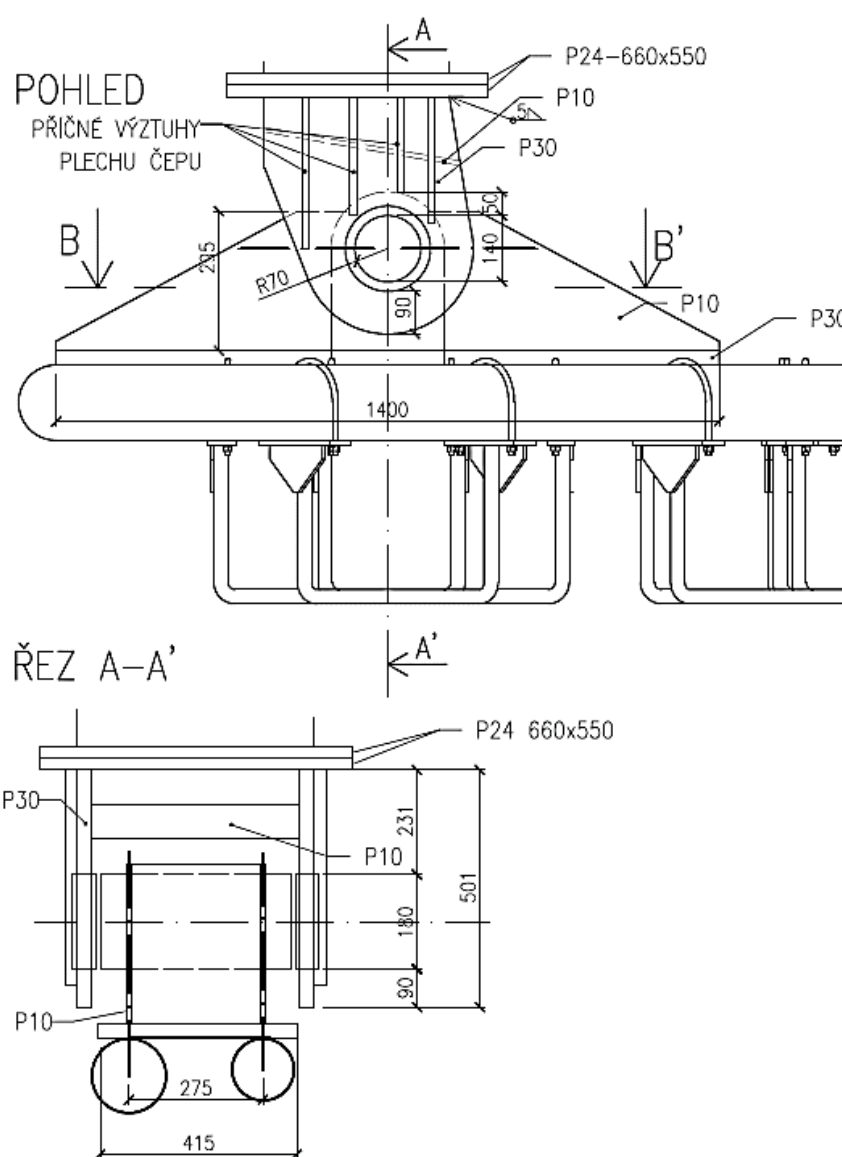
2.3.6 Posouzení čepového spoje dle normy ČSN EN 1993-1-8

Přípoj rozrušovače k vozíku je proveden pomocí plného kruhového dvojstřížného čepového spoje. Tento spoj je charakterizován jako kloubový, umožňuje natočení a brání pouze posunům v místě spoje ve všech směrech. Horní deska čepového přípoje tloušťky 30 mm je vyztužena svislými výztuhami, které zvyšují únosnost v ohybu při namáhání ohybovým momentem, který je způsobený vodorovnými reakcemi v místě čepového spoje na excentricitě 321 mm. Posudek čepového spoje je proveden v souladu s ČSN EN 1993-1-8 a s ohledem na nesplnění geometrických podmínek přípoje byl tento detail vymodelován skořepinovými prvky v software Scia Engineer a posouzen na splnění podmínky plasticity HMM.

Čepový spoj lze pokládat jako speciální případ prutu taženého oslabeného otvorem. Oproti klasickému taženému prutu s otvorem se u tohoto spoje vnáší zatížení do prutu pomocí vnitřního okraje otvoru přes čep zde vsunutý. Oslabení prutu způsobuje koncentraci napětí a lokální místní hodnoty napětí v oblasti otvoru. S ohledem na tento způsob namáhání a na nesplnění konstrukčních požadavků čepového přípoje byl proveden zjednodušující posudek spodní části prutu oslabeného otvorem pro vsunutí čepu, který prokazuje dostatečnou únosnost a odolnost proti porušení spoje.



Obr. 21: Reálná fotografie čepového přípoje rozrušovače k vozíku [20]



Obr. 22: Geometrie čepového přípoje

Vnitřní síly namáhající čepový přípoj byly stanoveny zvlášť pro obě základní polohy brány formou reakcí v místě kloubového podepření numerického modelu rozrušovací brány.

A) Vnitřní síly v horizontální poloze

Podporové reakce (ze software Scia Engineer 2015)

$$R_{x,Ed} = 83,96 \text{ kN}$$

$$R_{x,Ed} = 26,22 \text{ kN}$$

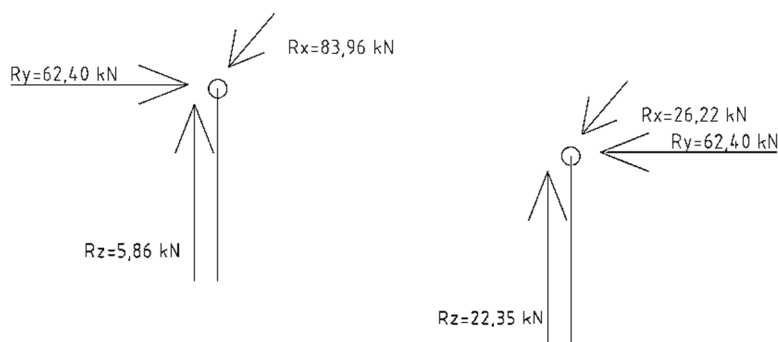
$$R_{y,Ed} = 62,40 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 62,40 \text{ kN}$$

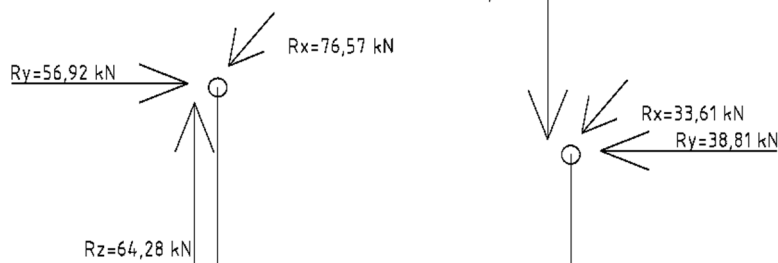
$$R_{z,Ed} = 5,86 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 22,35 \text{ kN}$$

HORIZONTÁLNÍ POLOHA - REAKCE



PRACOVNÍ POLOHA - REAKCE



Obr. 23: Reakce v místě čepového přípoje získané pomocí software Scia Engineer

B) Vnitřní síly v pracovní poloze

Podporové reakce (ze software Scia Engineer 2015)

$$R_{x,Ed} = 76,57 \text{ kN}$$

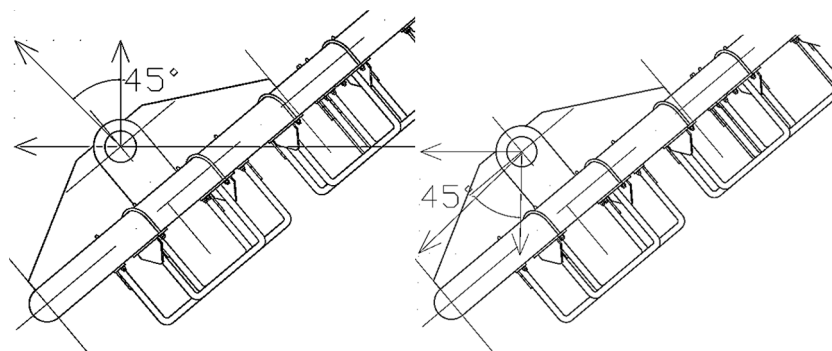
$$R_{x,Ed} = 33,61 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 56,92 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 38,81 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 64,28 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 17,92 \text{ kN}$$



Obr. 24: Působení reakcí v rovině čepu a směr výslednice

Reakce R_x působí na čep v rovině kolmé, způsobuje ohybový moment v horním prutu ukončujícím čepový přípoj. Reakce R_z a R_y způsobují stříh a otláčení. Určení výslednice působící v rovině čepu:

$$R_{v,1} = \sqrt{R_{y,Ed}^2 + R_{z,Ed}^2} = \sqrt{62,40^2 + 5,86^2} = 62,67 \text{ kN}$$

$$R_{v,2} = \sqrt{R_{y,Ed}^2 + R_{z,Ed}^2} = \sqrt{62,40^2 + 22,35^2} = 66,28 \text{ kN}$$

$$R_{v,3} = \sqrt{R_{y,Ed}^2 + R_{z,Ed}^2} = \sqrt{56,92^2 + 64,28^2} = 85,86 \text{ kN}$$

$$R_{v,4} = \sqrt{R_{y,Ed}^2 + R_{z,Ed}^2} = \sqrt{38,81^2 + 17,92^2} = 42,75 \text{ kN}$$

Posudek je proveden pro výslednici v pracovní poloze – pro nejvíce namáhaný čep na levé straně rozrušovací brány.

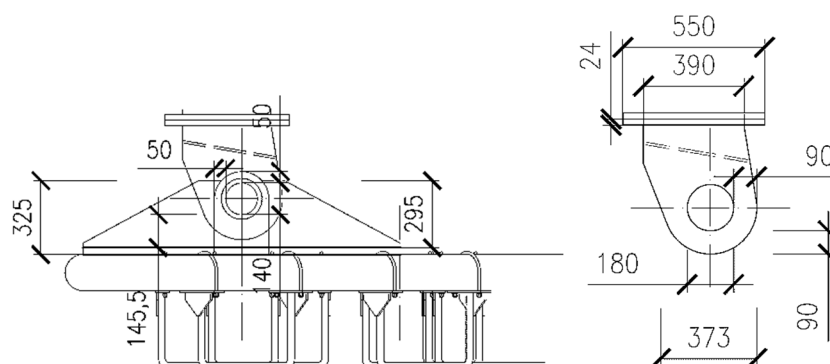
Charakteristiky čepu

Průměr čepu byl změřen v poskytnuté výkresové dokumentaci [14] na 138 mm.

M138

$$f_{up} = 510 \text{ MPa}$$

$$f_{yp} = 355 \text{ MPa}$$



Obr. 25: Geometrie čepového přípoje

$$d = 138 \text{ mm}$$

$$d_0 = 140 \text{ mm}$$

Ověření geometrie čepu

$$t \geq 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y}} = 0,7 \sqrt{\frac{85,86 \cdot 10^3 \cdot 1,00}{355 \cdot 10^6}} = 0,011 \text{ m}$$

$$t = 30 \text{ mm} \geq 11 \text{ mm}$$

$$a \geq \frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{2d_0}{3} = \frac{85860 \cdot 1,00}{2 \cdot 0,03 \cdot 355 \cdot 10^6} + \frac{2 \cdot 0,140}{3} = 0,097 \text{ m}$$

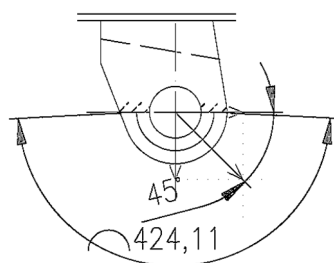
$$a = 90 \text{ mm} \geq 97 \text{ mm}$$

Podmínka není splněna.

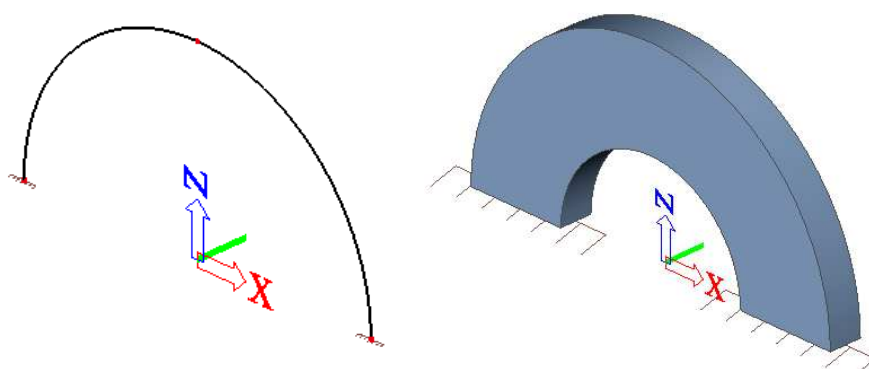
Tato podmínka není splněna, proto byl proveden v software Scia Engineer zjednodušený posudek části prutu ukončující čepový spoj. Jelikož se jedná o čep dvojstrážný, zatížení se uvažuje v poloviční hodnotě reakcí.

$$c \geq \frac{F_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{2 \cdot t \cdot f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{85860 \cdot 1,00}{2 \cdot 0,03 \cdot 355 \cdot 10^6} + \frac{0,140}{3} = 0,051 \text{ m}$$

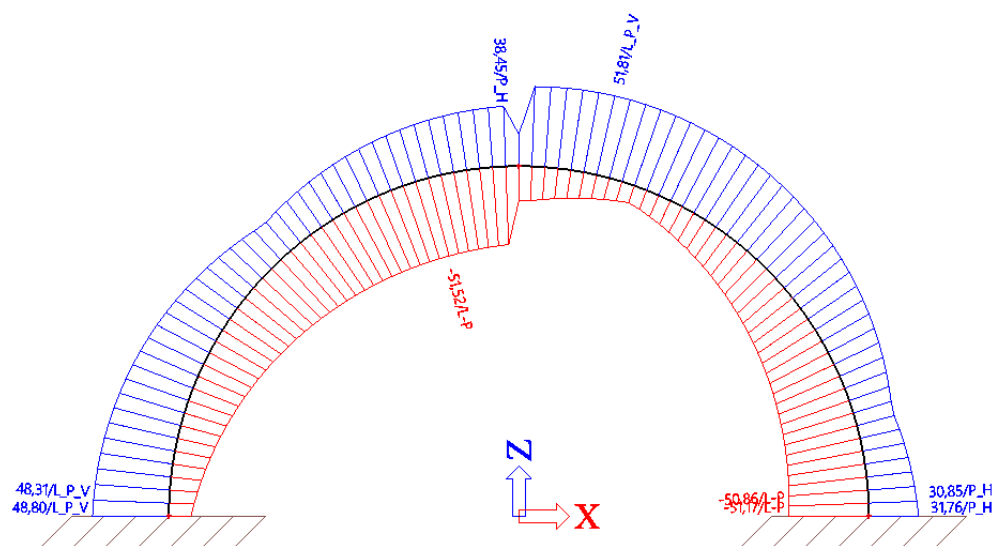
$$c = 90 \text{ mm} \geq 51 \text{ mm}$$



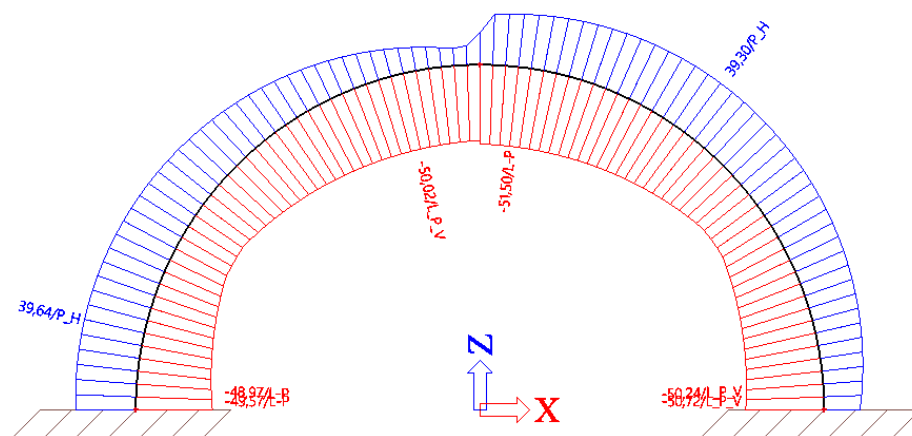
Obr. 26: Posuzovaná část prutu čepového přípoje



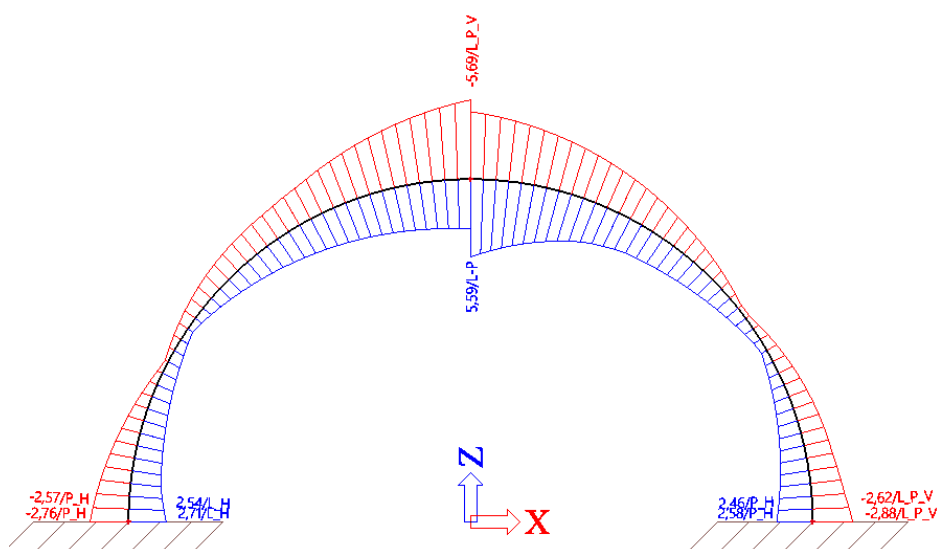
Obr. 27: Model části prutu čepového přípoje v software Scia Engineer



Obr. 28: Normálová síla N



Obr. 29: Posouvající síla V_z



Obr. 30: Ohybový moment M_y

Posudek průřezu – tahová únosnost

$$A = 90 \cdot 30 = 2700 \text{ mm}^2$$

$$N_{Ed,max} = 51,80 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}} = \frac{355 \cdot 2700}{1,15} \cdot 10^{-3} = 833,48 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 833,48 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 51,80 \text{ kN}$$

Posudek průřezu – smyková únosnost

$$A = 90 \cdot 30 = 2700 \text{ mm}^2$$

$$V_{Ed,max} = 51,50 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{355 \cdot 2700}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 481,21 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 481,21 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 51,50 \text{ kN}$$

Posudek průřezu – ohybová únosnost

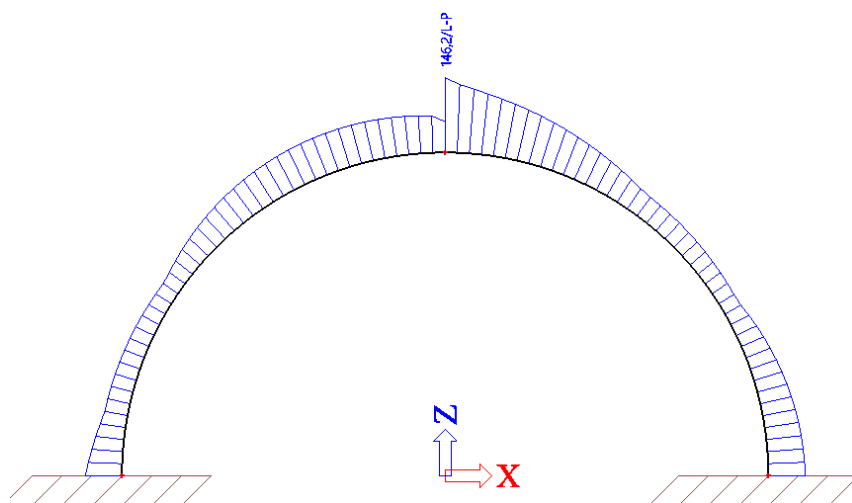
$$W_y = \frac{1}{6}bh^2 = \frac{1}{6}30 \cdot 90^2 = 40500 \text{ mm}^3$$

$$M_{Ed,max} = 5,69 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = \frac{f_y \cdot W_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{355 \cdot 40500}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 12,50 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = 12,50 \text{ kN} \geq M_{max} = 5,69 \text{ kNm}$$

Posudek napětí HMM podmínky plasticity



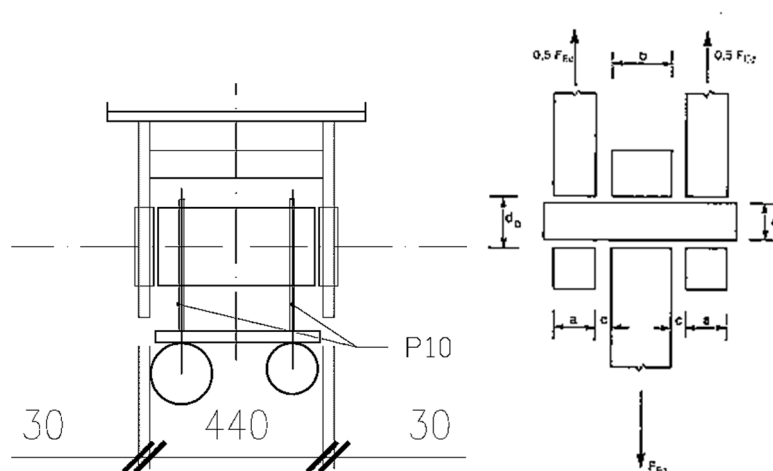
Obr. 31: Von Misesovo napětí

$$\sigma_{E} = 146,20 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1,15} = 308,70 \text{ MPa}$$

Navržený prut čepového přípoje **vyhoví** na stanovené reakce od rozrušovací brány.

Posudek jednotlivých způsobů porušení čepového spoje

Čepový přípoj se vlivem síly působící v rovině čepu může porušit stříhem nebo otláčením materiálu. Musí se také posoudit vzájemné spolupůsobení ohybového namáhání a namáhání smykovou silou.



Obr. 32: Geometrie čepového dvojstřížného přípoje

Únosnost čepu ve stříhu

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 138^2}{4} = 14957,12 \text{ mm}^2$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot A \cdot f_{sup}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 14957,12 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 3520,68 \text{ kN}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{85,860}{2} = 42,930 \text{ kN}$$

$$F_{v,Rd} = 3520,68 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 42,93 \text{ kN}$$

Čepový přípoj ve stříhu vyhovuje.

Únosnost čepu v otláčení

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 \cdot t \cdot d \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,5 \cdot 30 \cdot 138 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 1917,00 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 1917,00 \text{ kN} \geq F_{b,Ed} = 85,86 \text{ kN}$$

Čepový přípoj v otláčení vyhovuje.

Únosnost čepu v ohybu

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8}(b + 4c + 2a) = \frac{85860}{8}(0,420 + 4 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,03) \cdot 10^{-3} = 5,581 \text{ kNm}$$

$$W_{el} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 138^3}{32} = 258010,37 \text{ mm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 \cdot W_{el} \cdot F_{yp}}{\gamma_{Mo}} = \frac{1,5 \cdot 258010,37 \cdot 10^{-9} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,15} = 119,47 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 119,47 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 5,581 \text{ kNm}$$

Čepový přípoj vyhovuje na únosnost v ohybu.

Únosnost čepu při kombinaci střihu a ohybu

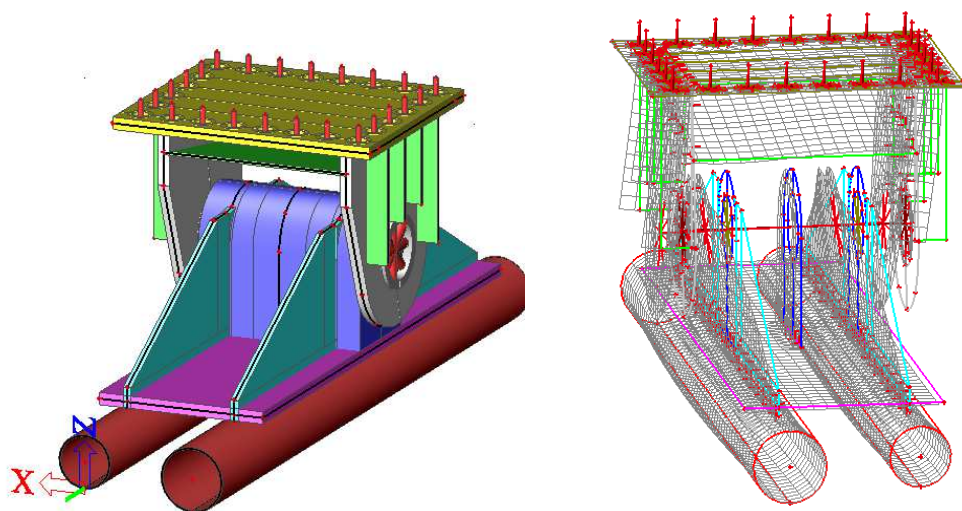
$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1,00$$

$$\left[\frac{5,581}{119,47} \right]^2 + \left[\frac{73,70}{3520,68} \right]^2 = 0,003 \leq 1,00$$

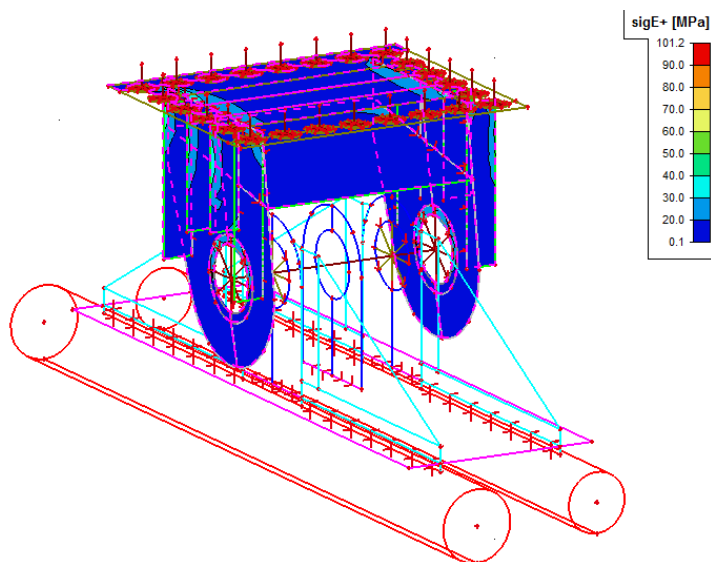
Čepový přípoj vyhovuje na kombinaci střihu a ohybu.

2.3.7 Posudek čepového spoje pomocí skořepinového modelu

Čepový spoj byl vymodelován v software Scia Engineer v obecné pracovní rovině XYZ pomocí skořepinového modelu, kdy jednotlivé plochy jsou reprezentovány vlastní střednicí. Posudek von Misesova napětí (srovnávací napětí σ_E) byl proveden pro obě polohy samostatně pro příslušné hodnoty reakcí získané pomocí software Scia Engineer z numerického modelu rozrušovací brány. Jelikož je předmětem posuzování především boční plech čepového přípoje není potřeba umísťovat model styčnicku do numerického modelu brány z důvodu použití správných okrajových podmínek. Lze předpokládat, že horní část čepového přípoje je podepřena v místě šroubů, které vytváří přírubový spoj s konstrukcí vozíku a zatížení čepu je vneseno pomocí bodové síly do středu samotného čepu, který je reprezentován soustavou tuhých prutů propojující jednotlivé části modelu.



Obr. 33: Skořepinový model čepového spoje v horizontální poloze a deformovaná konstrukce

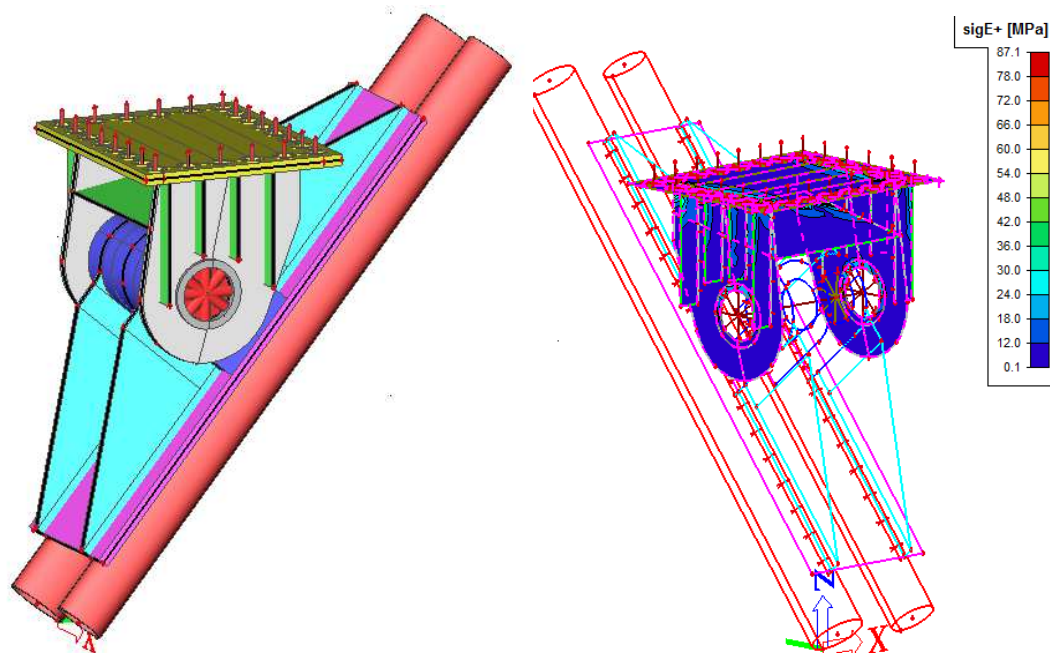


Obr. 34: Von Misesovo napětí na čepovém spoji

Pro posouzení splnění podmínky plasticity je vybráno větší srovnávací napětí na povrchu konstrukce.

$$\sigma_{E+} = 101,20 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1,15} = 308,70 \text{ MPa}$$

Navržený čepový spoj vyhoví na namáhání v horizontální poloze.



Obr. 35: Skořepinový model čepového spoje v pracovní poloze a Von Misesovo napětí na spoji

$$\sigma_{E+} = 87,10 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{355}{1,15} = 308,70 \text{ MPa}$$

Navržený čepový spoj vyhoví na namáhání v pracovní poloze.

3 Numerický model konstrukce vozíku v provozním stavu

3.1 Konstrukce kladkostroje

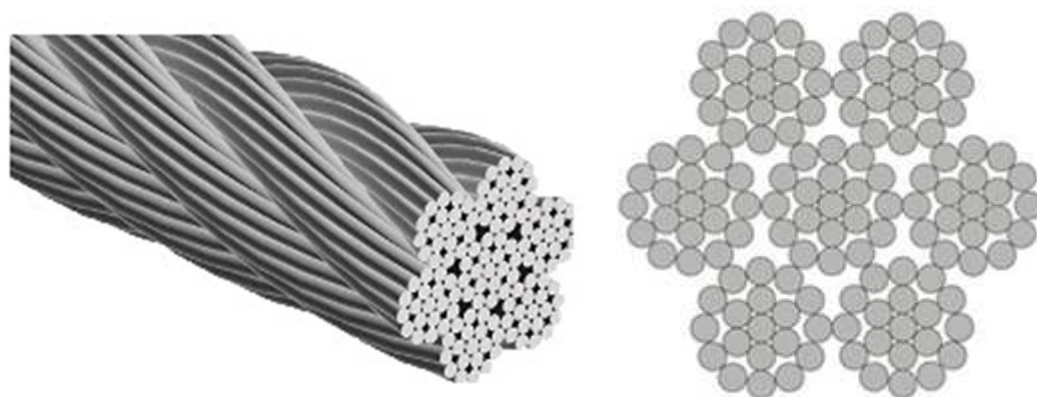
Konstrukce pro kladkostroj je umístěná na vozíku, který se pohybuje po hlavním mostovém tenkostěnném nosníku. Plní dvě základní funkce – funkce revizní a slouží jako konstrukce k napínání lan. Lana umožňují nastavit rozrušovače borité rudy do požadované polohy, jejich pozice a směry napnutí jsou předepsány technologií a odečteny z výkresu [20].

3.1.1 Posudek lana

Lano je osově zatížené tahovou reakcí od rozrušovací brány. Lze dané lano charakterizovat idealizovaným výpočtovým modelem, pro který platí zjednodušující předpoklady - jedná se o dokonale ohebné vlákno (ohybový

moment, posouvající síla a tlaková normálová síla v laně jsou hodnoty nulové), lano je dokonale neprůtažné a nehmotné (vlastní tíha je ve srovnání s ostatním působícím zatížením zanedbatelná). Pro danou konstrukce je navrženo lano průměru 9 mm s pevností 1770 MPa.

Návrh ocelového lana



Obr. 36: Konstrukční struktura ocelového lana (fa Elis) [15]

Charakteristiky lana


Pevnost drátku 1770 MPa

Průměr lana 9 mm

Celkový počet drátů 133 ks

Jádro z ocelových drátů (drátěná duše)

Jedná se o lano vinuté klasickým způsobem, se středním počtem drátů. Lano je ohebné (lze použít kladky středních průměrů) a jsou odolná proti otěru.

ČSN 02 4323 DIN 3060	Průměr lana mm	Hmotnost kg/m	Jmenovitá únosnost lana v kN při jmenovité pevnosti drátů v MPa		
			1570	1770	1960
 6 × (1 + 6 + 12) + 1(1 + 6 + 12)	3,15	0,038		7,39	8,18
	3,55	0,048		9,27	10,27
	4,00	0,060		11,56	12,80
	4,50	0,075		14,49	16,05
	5,00	0,095	16,10	18,30	20,31
	6,30	0,150	26,24	29,58	32,75
	7,10	0,190	33,21	37,44	41,75
	8,00	0,240	41,00	46,22	51,18
	9,00	0,300	51,43	57,98	64,21
	10,00	0,380	65,09	73,38	81,26
	12,00	0,548	93,70	106,00	
	14,00	0,746	128,00	144,00	
	16,00	0,974	167,00	188,00	

Tab. 1: Jmenovitá únosnost lana v kN (fa Elis) [15]

Součinitel bezpečnosti k se stanoví jako podíl jmenovité pevnosti lana a maximálního zatížení lana. Jmenovitá pevnost lana proto musí být do posudku snížena o pokles pevnosti, který je způsobený ohybem lana.

$$N_{max} \leq F_d = \frac{F_p}{k} \quad (1)$$

$$N_{max} = \frac{18,11}{2} \cdot k \leq F_d$$

$$N_{max} = 45,28 \text{ kN} \leq F_d = 57,98 \text{ kN}$$

kde

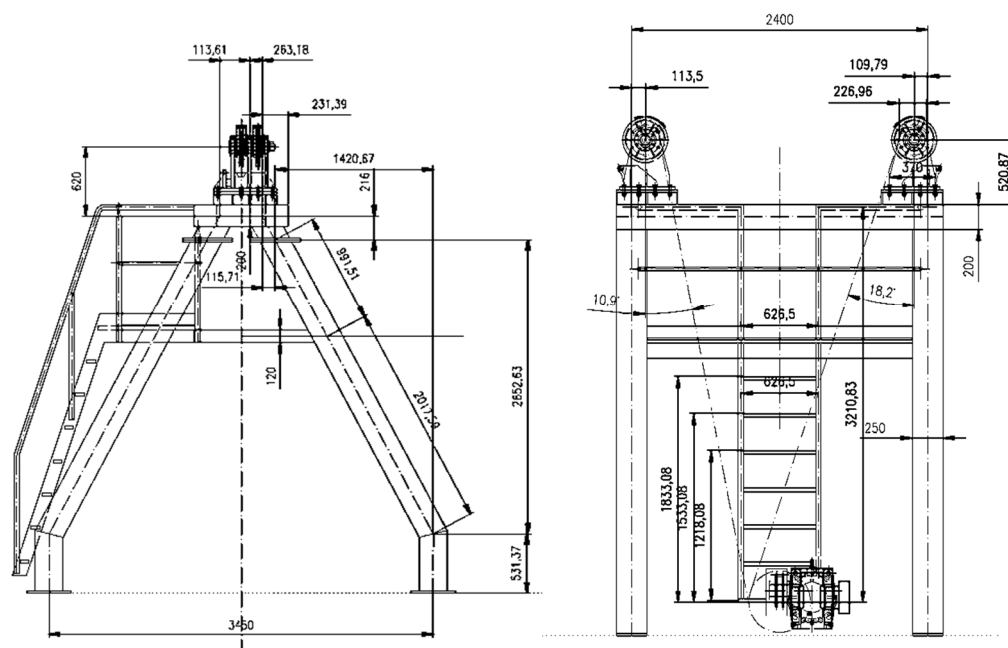
N_{max} [kN] osová síla v laně (tahová)

F_d [kN] jmenovitá únosnost lana

k [-] součinitel bezpečnosti (5,00 – důlní zatížení, lana zdvihadel)

Navržené lano vyhovuje.

3.1.2 Geometrické charakteristiky konstrukce kladkostroje



Obr. 37: Geometrie konstrukce kladkostroje

Konstrukce je součástí vozíku MBSk 600, slouží k přenesení sil od lana zajišťujícího pracovní polohu rozrušovací brány. Na konstrukci se nachází revizní plošina, která umožňuje kontrolu případně rychlou opravu kladkostroje a lan.

3.1.3 Zatížení konstrukce kladkostroje

Na konstrukci kladkostroje je uvažováno působící zatížení:

- **Vlastní tíha** - automaticky generováno softwarem (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Síla působící v lanech**, které zajišťují pracovní polohu rozrušovací brány (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QR}=1,5$)
- **Zatížení ostatní stálé** – zábradlí, revizní plošina, žebříky (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení užité** – revizní plošina, zábradlí, žebříky (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve svislém směru v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)

- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru kolmo k podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,02$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru v podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)

Tíha zábradlí je stanovena odhadem na délku prvku v hodnotě 0,12 kN/m, hmotnost ocelového žebříku (předpokládá se žebřík zavěšený na konstrukci podlahy revizní lávky) s ochranným košem je stanovena odhadem na hodnotu 0,22 kN bodové osamělé síly. Výpočet dynamického zatížení se provedl z hmotností jednotlivých profilů pro jednotlivé směry stanovené v souladu s normou ČSN 27 7008.

Dynamické zatížení svislé a vodorovné ve směru podélné osy:

Sloup	$q_k = 89,7 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0628 \text{ kN/m}$
-------	---

Vodorovné nosníky	$q_k = 70,8 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0496 \text{ kN/m}$
-------------------	---

Nosníky revizní lávky	- vnější
	$q_k = (28,1 + 0,11) \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0198 \text{ kN/m}$
	- vnitřní

$$q_k = 28,1 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0197 \text{ kN/m}$$

Pochozí rošt revizní lávky	$q_k = 18,7 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0131 \text{ kN/m}$
----------------------------	---

Konstrukce kladek	$q_k = 246,5 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,173 \text{ kN/m}$
-------------------	---

Dynamické zatížení vodorovné ve směru kolmém k podélné ose:

Sloup	$q_k = 89,7 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,0142 \text{ kN/m}$
-------	---

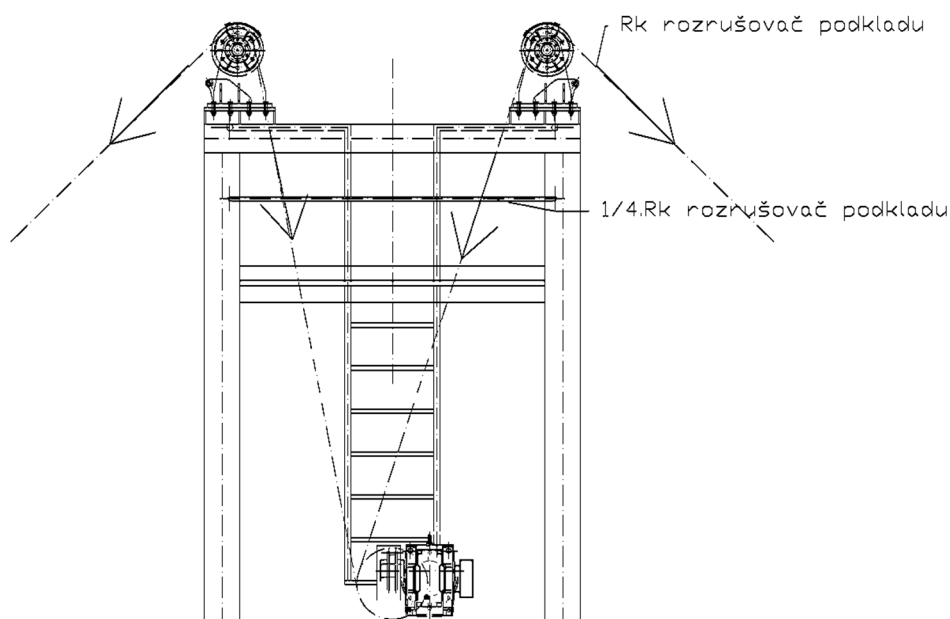
Vodorovné nosníky	$q_k = 70,8 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,0142 \text{ kN/m}$
-------------------	---

Nosníky revizní lávky	- vnější
	$q_k = (28,1 + 0,11) \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,006 \text{ kN/m}$
	- vnitřní

$$q_k = 28,1 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,0056 \text{ kN/m}$$

Pochozí rošt revizní lávky $q_k = 18,7 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,004 \text{ kN/m}$

Konstrukce kladek $q_k = 246,5 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,049 \text{ kN/m}$



Obr. 38: Technologické zatížení konstrukce kladkostroje

Výpočetní model v software Scia Engineer je součástí numerického modelu vozíku a uvažuje se prutový pro celou konstrukci. Ve spodních uzlech je konstrukce kladkostroje vetknutá (rámový přípoj), jelikož je konstrukce k vozíku MBSk 600 připojena šroubovým přírubovým spojem. V horní části je nahrazena hmota kladkostroje pomocí prutu kruhového průřezu průměru 200 mm.

3.1.4 Návrh pochozího roštu revizní lávky

Na revizní lávce je navržen pochozí rošt s rozměrem pole 600 x 1545 mm. V souladu s ČSN 27 7008 je zatížení uvažované jako rovnoměrné spojité pro lávky, schody a plošiny v hodnotě 1,5 kN/m². Navržený rošt je odporově svařovaný typu SP 225-34/38-3 [18] s nosným pásem 25x2 mm. Hmotnost roštu se pohybuje kolem hodnoty 18,7 kg/m².

NOSNOSTNÍ TABULKA - ODPOROVĚ SVAŘOVANÉ ROŠTY SP

Typ roštu	Nosný pás	Rozteče	ca. pozink. hmotnost kg/m ²	*	500	600	700
SP 225-34/38-3	25 x 2 mm	34 x 38 mm	18,7	Fv	31,05	21,60	15,85
				f	1,60	2,30	3,10
				Fp	2,65	2,15	1,80
				f1	1,50	2,10	2,80
SP 230-34/38-3	30 x 2 mm	34 x 38 mm	21,5	Fv	44,75	31,10	22,86
				f	1,30	1,90	2,60
				Fp	3,80	3,05	2,55
				f1	1,20	1,70	2,30

Tab. 2: Zatížení a charakteristiky pochozího roštu [18]

Posudek pochozího roštu

$$q_d = q_k \cdot \gamma_q \cdot 1,10 \leq \frac{F_v}{k}$$

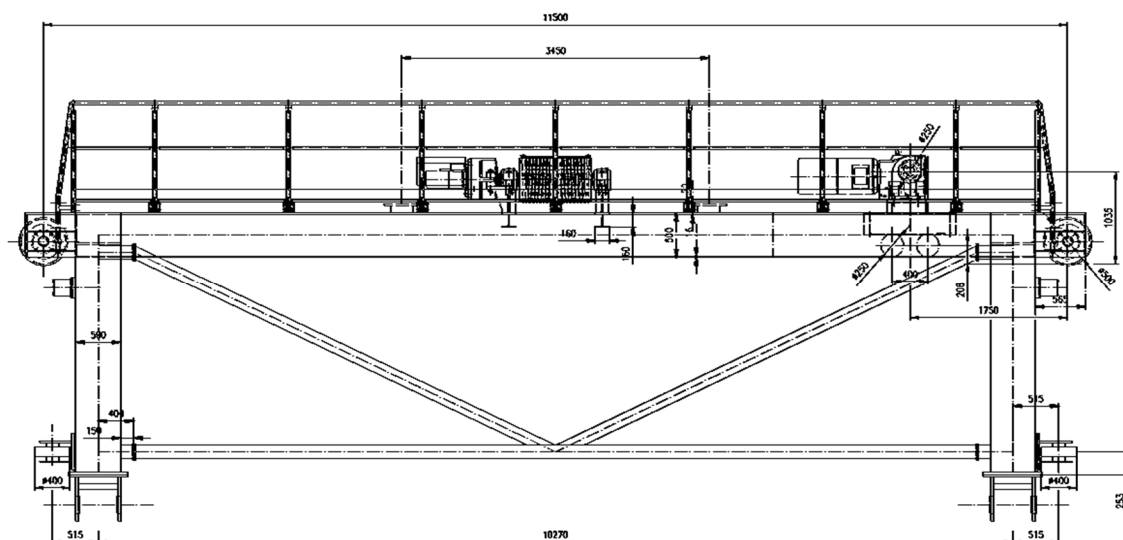
$$q_d = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,10 \leq F_d = \frac{21,60}{1,5}$$

$$q_d = 1,98 \frac{kN}{m^2} \leq F_d = 14,40 \frac{kN}{m^2}$$

Navržený rošt vyhovuje.

3.2 Vozík MBSk 600

Konstrukce vozíku je umístěná na hlavní tenkostěnný uzavřený nosník mostového shrnovače a slouží pro změnu polohy rozrušovací brány vzhledem k příčnému směru pojezdu stroje. Vozík je opatřen nárazníky na obou stranách v osově vzdálenosti v podélném směru 11 300 mm. Pojezd vozíku je definovaný ve výkrese hodnotou 9 000 mm [20]. Na konstrukci vozíku je umístěná konstrukce pro kladkostroje (viz kapitola 3.1), která slouží k napínání lan sloužících ke změně polohy rozrušovače ve směru horizontálním. Rozrušovače jsou připojeny k vozíku pomocí čepového spoje, jehož návrh a posudek je uveden v kapitole 2.3.6 a 2.3.7. Hmotnost vozíku je stanovena pomocí software Scia Engineer na cca 15,34 tun.



Obr. 39: Konstrukce vozíku

3.2.1 Zatížení konstrukce vozíku

Na konstrukci vozíku je uvažováno působící zatížení:

- **Vlastní tíha** – automaticky generována softwarem (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení ostatní stálé** – zábradlí, pochozí rošt, reakce od vlastní tíhy rozrušovací brány (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení proměnné** – zatížení vznikající při přičení na kolejnicích (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QF}=1,1$)
- **Zatížení užité** – zábradlí, pochozí plocha (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$)
- **Zatížení užité** – mechanické zařízení (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$)
- **Zatížení mimořádné** – síla na nárazník při nárazu vozíku do nárazníku hlavní konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,1$)

Jelikož je rychlost pohybu vozíku $1 \text{ m/s} \geq 0,7 \text{ m/s}$ musí být nárazníky schopné pohltit kinetickou energii pohybujících se hmot.

Stanovení síly na nosnou konstrukci při pohybu je provedeno v souladu s ČSN EN 1991-3 pro 70 % až 100 % podélné rychlosti pojezdu, tedy pro rychlost $v_1 = 1,0 \text{ m/s}$.

Hmotnost konstrukce vozíku:

$$m = 14,40 \text{ tun}$$

Konstanta tuhosti nárazníku (odhad): $S_b = 1565 \text{ kNm}^{-1}$

Síla na nárazník:

$$H_{B,1} = \frac{v_1 \sqrt{m_c \cdot S_B}}{n_r} = \frac{1,00 \cdot \sqrt{14400 \cdot 1565 \cdot 10^3}}{2} = 75 \text{ kN}$$

- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve svislém směru v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru kolmo k podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,02$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru v podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)

Zatížení vznikající při přičení na kolejnicích

Vozík je podepřen čtyřbodovým podvozkem s rozvorem podvozku 11 500 mm a rozchodem podvozku 2 400 mm. Velikost síly přičení se stanoví dle ČSN 27 7008 jako:

Součet tlaků na více zatížené straně: $N = 36,93 + 33,60 = 70,53 \text{ kN}$

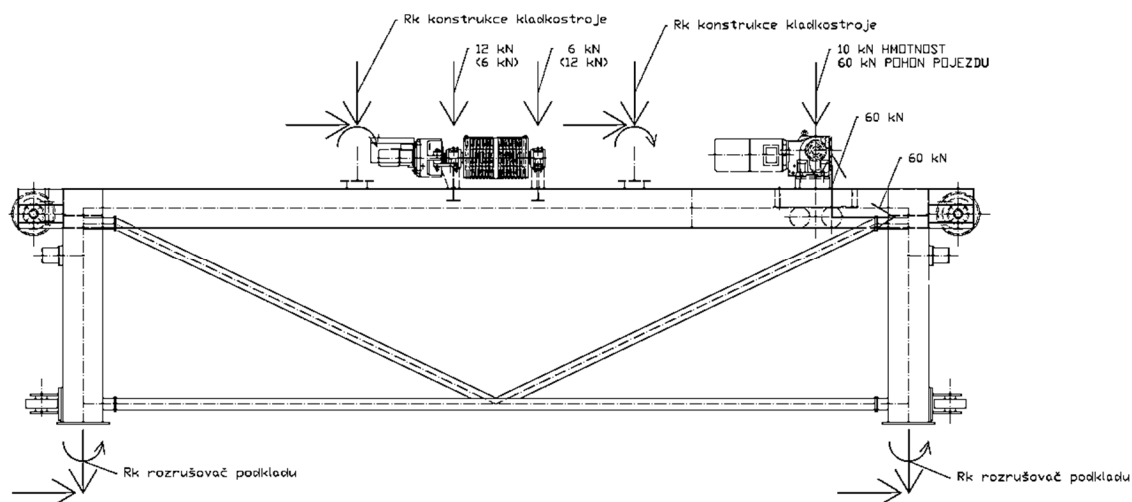
Součinitel přičení se stanoví na základě grafu v ČSN EN 27 7008.

$$\frac{L}{s} = \frac{2400}{11500} = 0,208 \dots \psi = 0,050$$

$$H = \psi \cdot \sum N = 0,050 \cdot 70,53 = 3,53 \text{ kN}$$

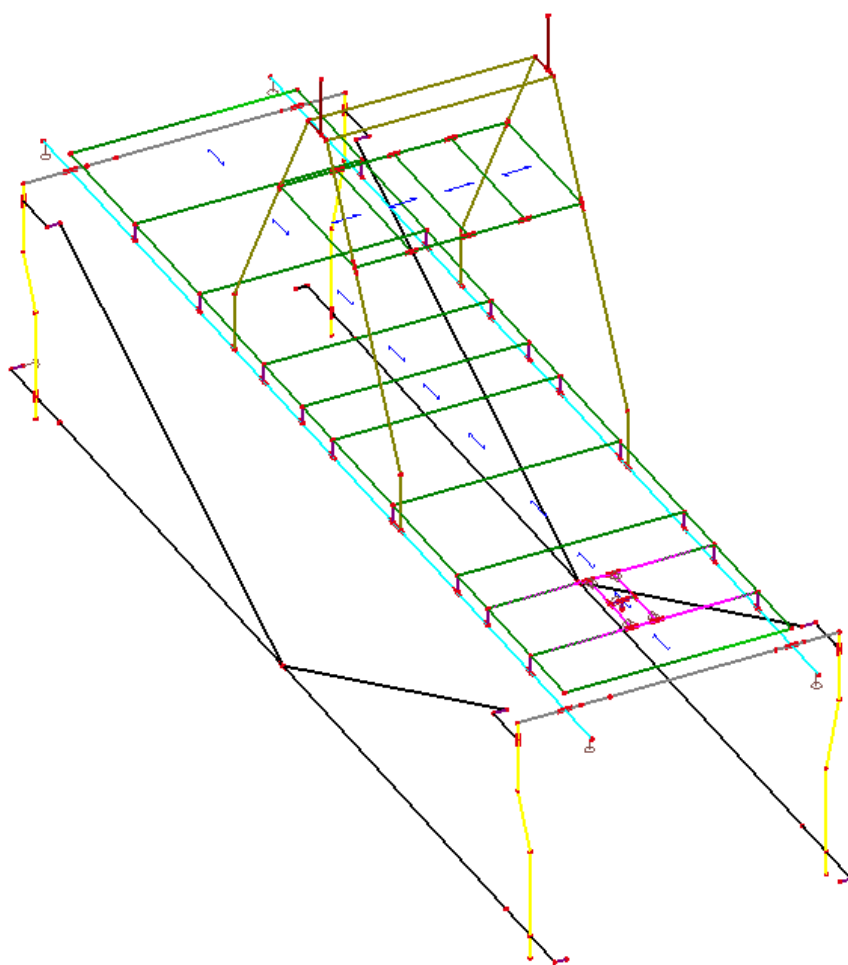
$$H \cdot \frac{s}{L} = 3,53 \cdot 0,208 = 0,734 \text{ kN}$$

Vzhledem k excentricitě čepového přípoje rozrušovací brány k přírubovému spoji vozíku se musí mimo samotné reakce místo přípoje zatížit také ohybovými momenty viz obrázek č. 40.

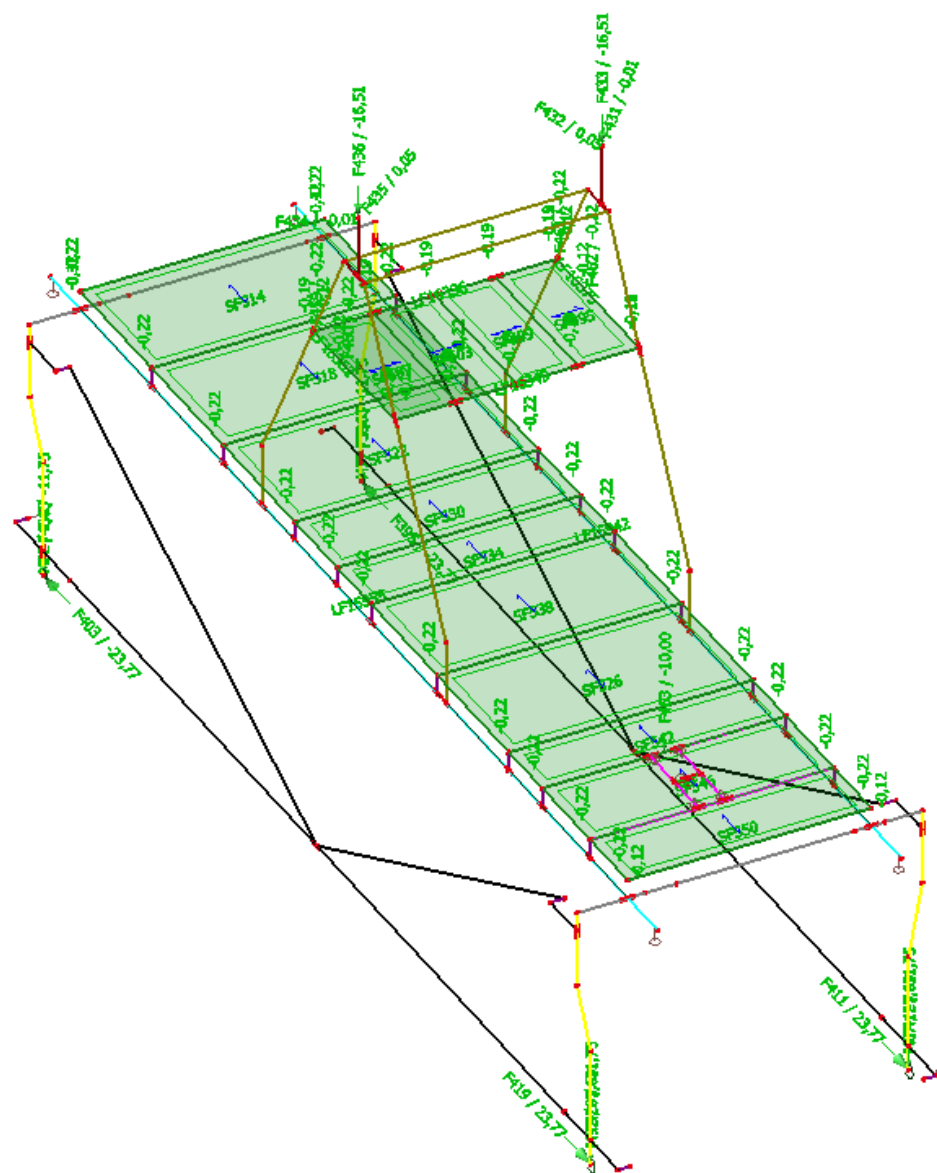


Obr. 40: Technologické zatížení vozíku

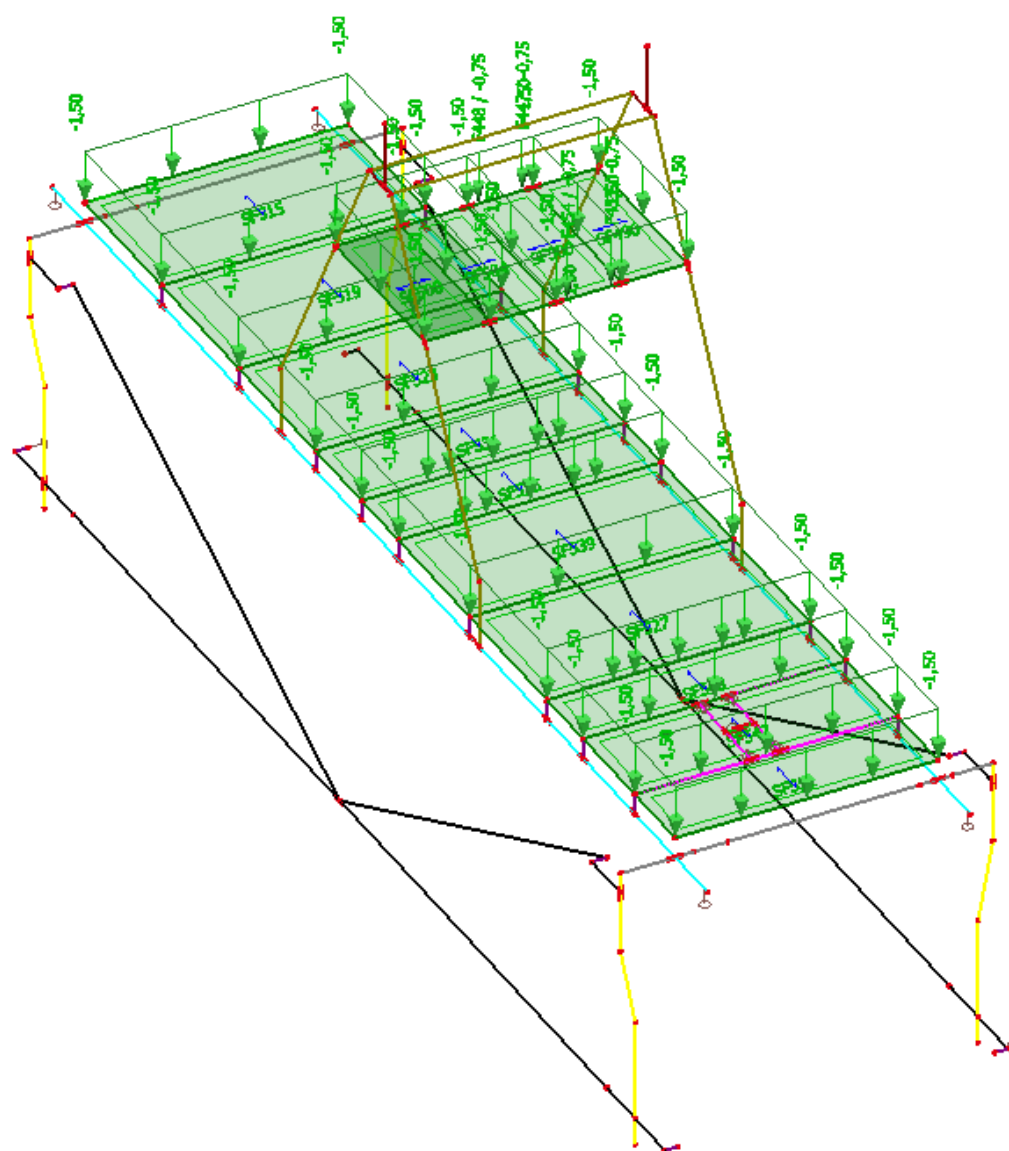
Zadané zatížení do software Scia Engineer je zobrazeno na obrázcích č. 41 až 50, včetně vymodelovaného numerického modelu.



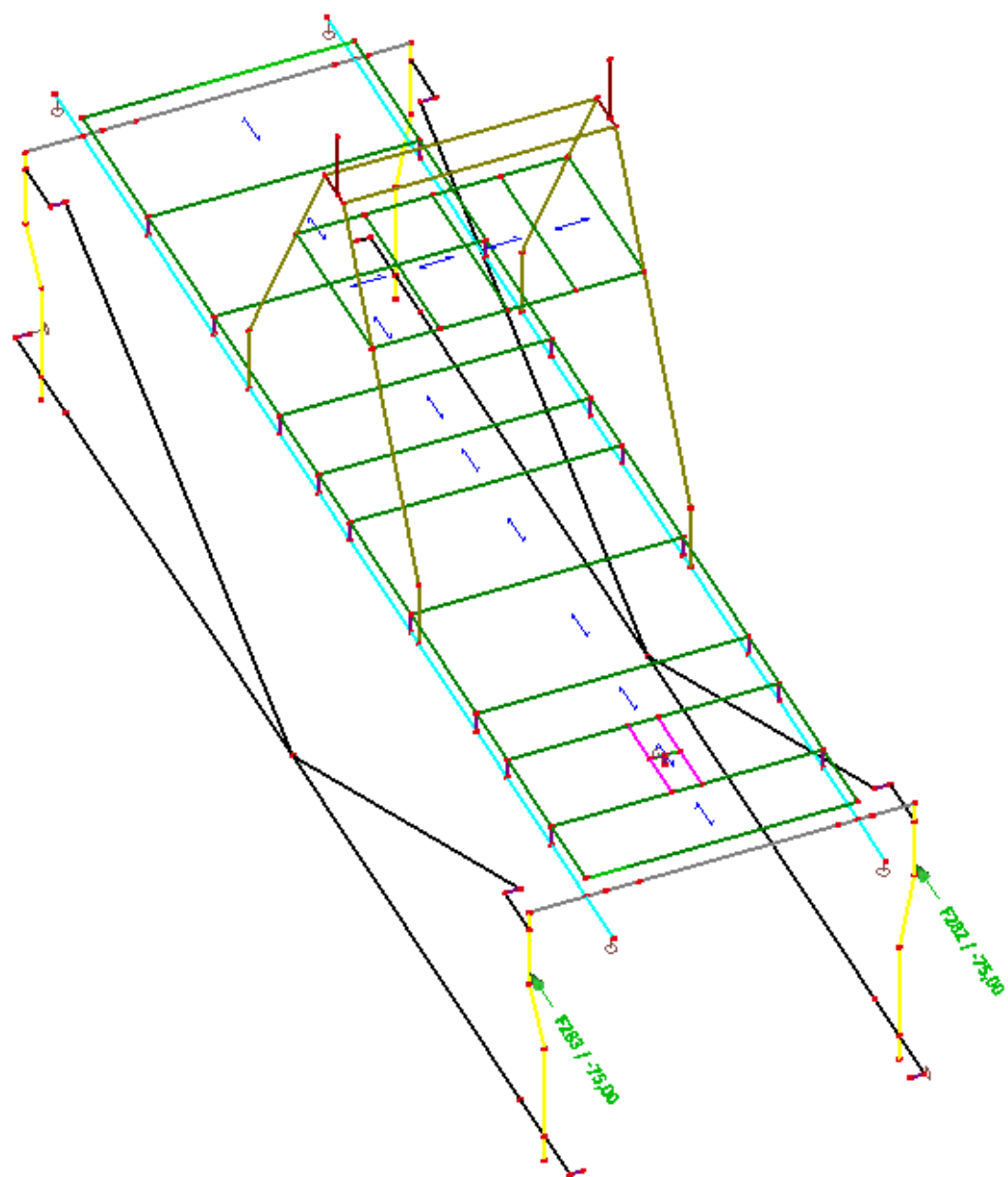
Obr. 41: Numerický model vozíku



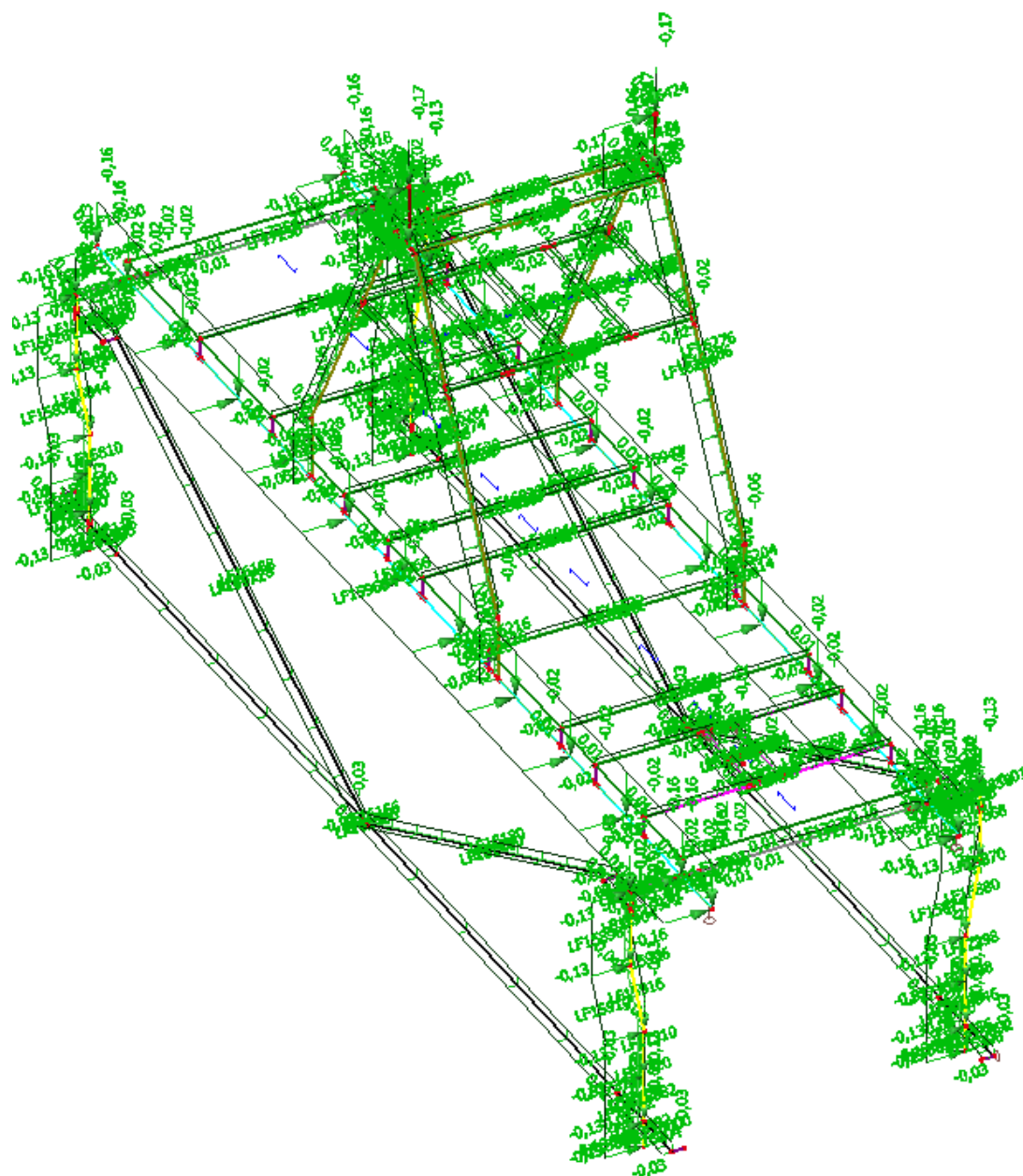
Obr. 42: Ostatní stálá zatížení



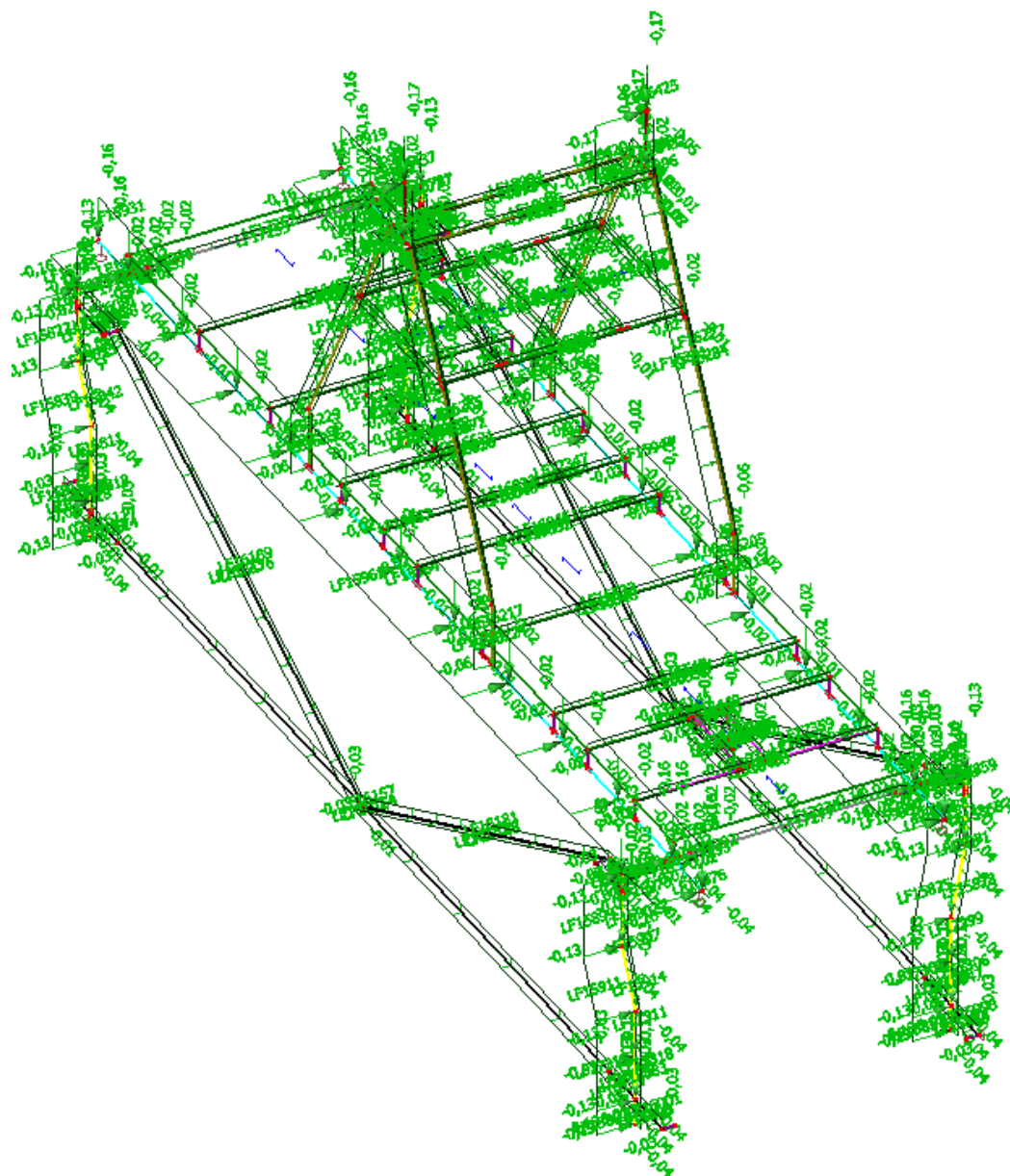
Obr. 43: Zatížení užité



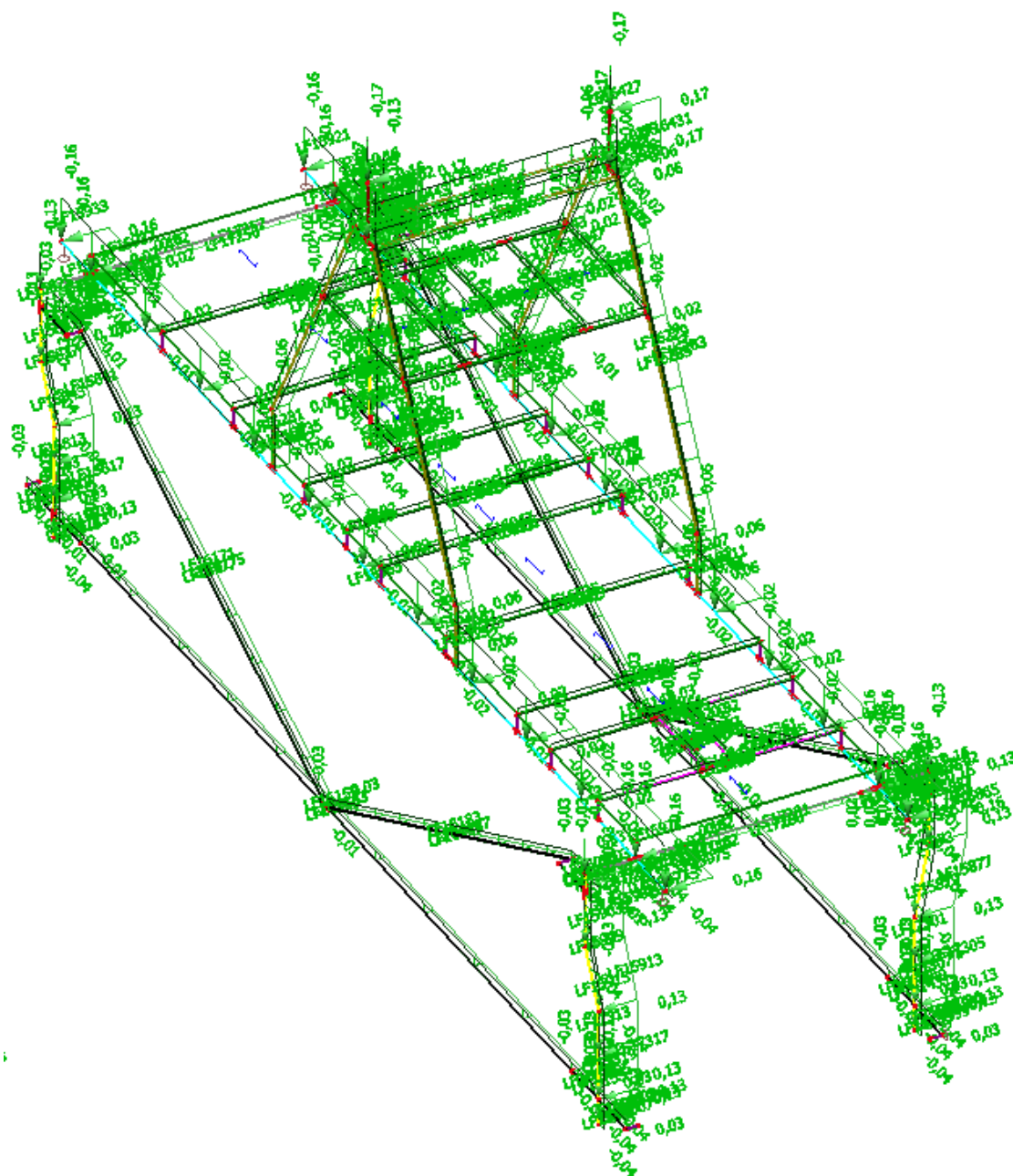
Obr. 44: Zatížení nárazem



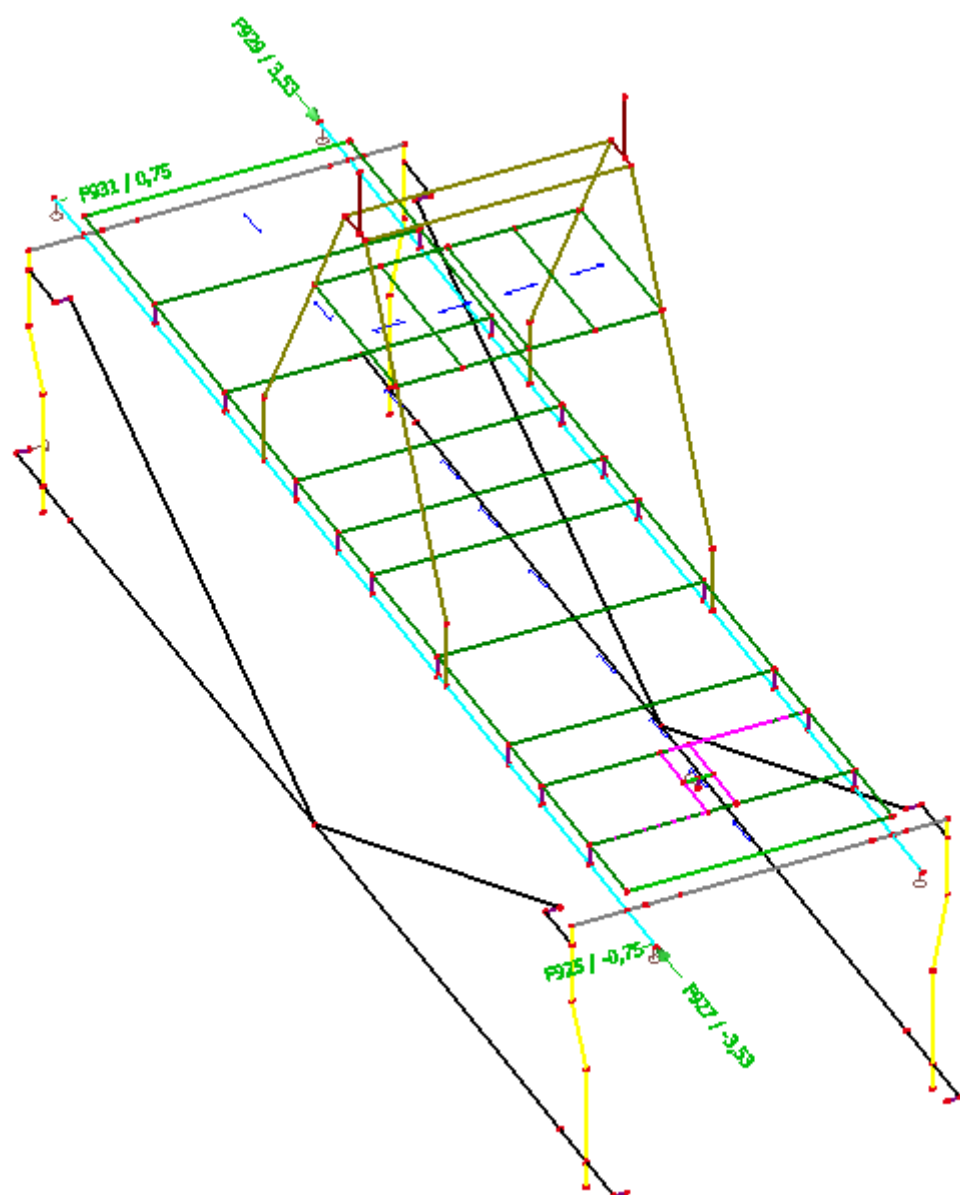
Obr. 45: Zatížení dynamické ve směru osy z^+ , y^+ a x^+



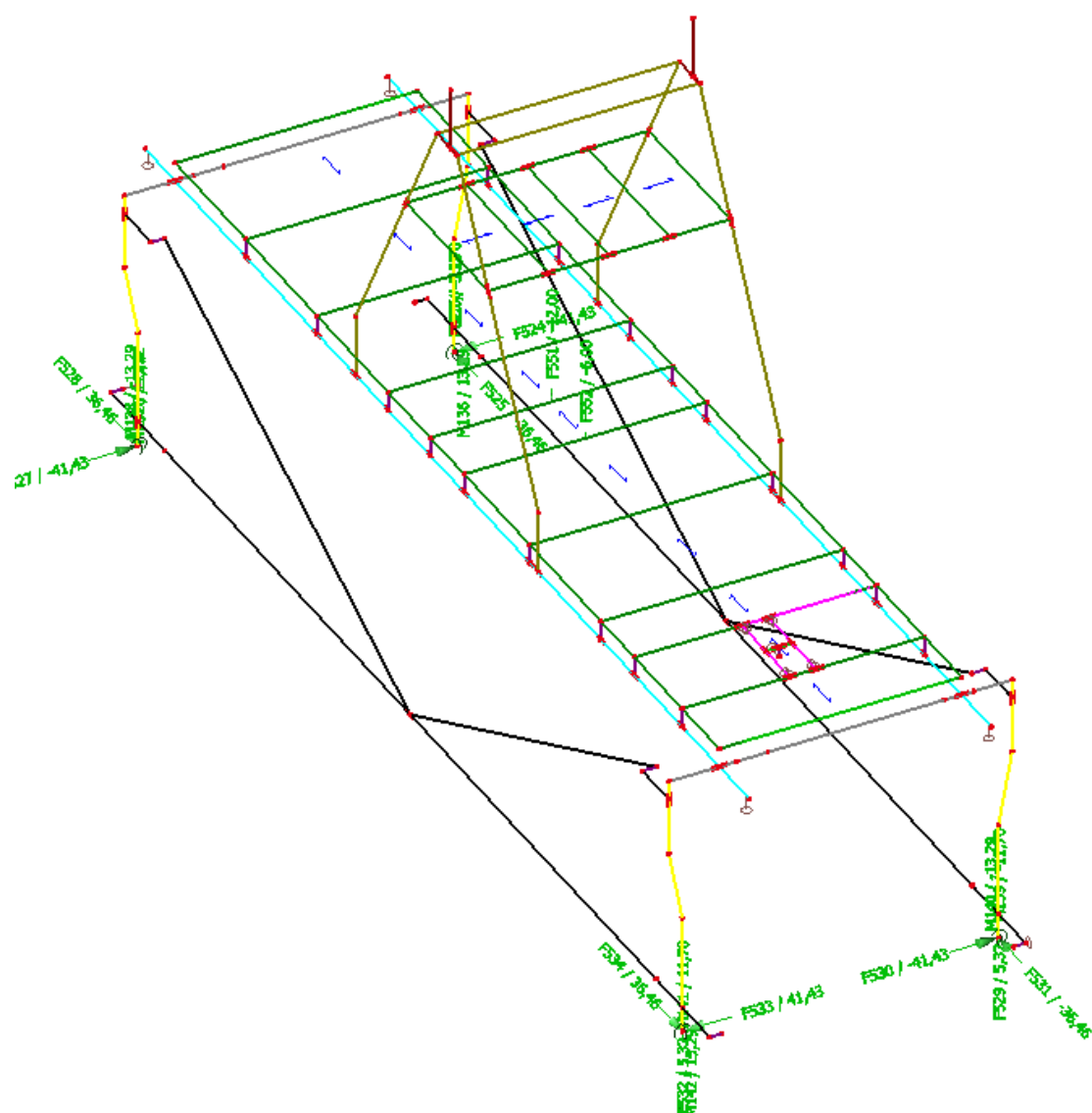
Obr. 46: Zatížení dynamické ve směru osy z+, y- a x+



Obr. 47: Zatížení dynamické ve směru osy z+, y- a x-



Obr. 48: Zatížení od příčeni



Obr. 49: Zatížení od rozrušovací brány při pojezdu vozíku doprava

NOSNOSTNÍ TABULKA - ODPOROVĚ SVAŘOVANÉ ROŠTY SP

Typ roštu	Nosný pás	Rozteče	ca. pozink. hmotnost kg/m²	*	Světla rozteč podpěr v mm								
					500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
SP 225-34/38-3	25 x 2 mm	34 x 38 mm	18,7	Fv	31,05	21,60	15,85	12,15	9,60	7,75	6,40	5,40	
				f	1,60	2,30	3,10	4,10	5,10	6,30	7,70	9,10	
				Fp	2,65	2,15	1,80	1,50	1,35	1,20	1,05	1,00	
				f1	1,50	2,10	2,80	3,60	4,50	5,50	6,70	7,80	
				Fv	44,75	31,10	22,85	17,50	13,80	11,20	9,25	7,75	6,60
SP 230-34/38-3	30 x 2 mm	34 x 38 mm	21,5	f	1,30	1,90	2,60	3,40	4,30	5,30	6,40	7,60	8,90
				Fp	3,80	3,05	2,55	2,20	1,90	1,70	1,50	1,40	1,30
				f1	1,20	1,70	2,30	3,00	3,80	4,60	5,50	6,60	7,60
				Fv	76,55	55,20	40,60	31,10	24,55	19,80	16,45	13,80	11,80
				f	1,30	1,90	2,60	3,40	4,30	5,30	6,40	7,60	8,90

Tab. 3: Zatížení a charakteristiky pochozího roštu pro vozík [18]

Posudek roštu

$$q_d = q_k \cdot \gamma_q \cdot 1,10 \leq \frac{F_v}{k}$$

$$q_d = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,10 \leq F_d = \frac{6,60}{1,5}$$

$$q_d = 1,98 \frac{kN}{m^2} \leq F_d = 4,4 \frac{kN}{m^2}$$

Navržený rošt vyhovuje.

3.2.3 Zatížení od rozrušovače borité rudy

Excentricita k těžišti čepového spoje je 321 mm, vzniká tedy namáhání mimo samotných reakcí také ohybovým momentem způsobeným danou excentricitou. Vozík je zatížen reakcemi z obou základních poloh rozrušovací brány ve dvou zatěžovacích stavech.

A) Vnitřní síly v horizontální poloze

Reakce od rozrušovací brány - vlastní tíha (ze software Scia Engineer 2015)

$$R_{x,Ed} = 23,77 \text{ kN}$$

$$R_{x,Ed} = 23,77 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 0,00 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 11,75 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 11,73 \text{ kN}$$

Ohybové momenty od reakcí

$$M_{x,Ed} = R_{x,Ed} \cdot e_z = 23,77 \cdot 0,321 = 7,63 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} = R_{y,Ed} \cdot e_z = 0,00 \cdot 0,321 = 0,00 \text{ kNm}$$

Reakce od rozrušovací brány – užité technologie

$$R_{x,Ed} = 36,46 \text{ kN}$$

$$R_{x,Ed} = 36,46 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 41,43 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 41,43 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 5,32 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 5,32 \text{ kN}$$

Ohybové momenty od reakcí:

$$M_{x,Ed} = R_{x,Ed} \cdot e_z = 36,46 \cdot 0,321 = 11,70 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} = R_{y,Ed} \cdot e_z = 41,43 \cdot 0,321 = 13,29 \text{ kNm}$$

Hodnoty reakcí od dynamických účinků v souladu s ČSN 27 7008 jsou zanedbatelných hodnot, proto se do zatížení vozíku neuvažují.

B) Vnitřní síly v pracovní poloze

Reakce od rozrušovací brány vlastní tíha (ze software Scia Engineer 2015)

$$R_{x,Ed} = 17,30 \text{ kN}$$

$$R_{x,Ed} = 17,30 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 7,53 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 7,53 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 19,35 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 19,35 \text{ kN}$$

Ohybové momenty od reakcí

$$M_{x,Ed} = R_{x,Ed} \cdot e_z = 17,30 \cdot 0,321 = 5,55 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} = R_{y,Ed} \cdot e_z = 7,53 \cdot 0,321 = 2,41 \text{ kNm}$$

Reakce od rozrušovací brány – užité – zatížení od technologie

$$R_{x,Ed} = 36,46 \text{ kN}$$

$$R_{x,Ed} = 36,46 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 31,60 \text{ kN}$$

$$R_{y,Ed} = 31,60 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 27,32 \text{ kN}$$

$$R_{z,Ed} = 27,32 \text{ kN}$$

Ohybové momenty od reakcí

$$M_{x,Ed} = R_{x,Ed} \cdot e_z = 36,46 \cdot 0,321 = 11,70 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} = R_{y,Ed} \cdot e_z = 31,60 \cdot 0,321 = 10,14 \text{ kNm}$$

Hodnoty reakcí od dynamických účinků v souladu s ČSN 27 7008 jsou zanedbatelných hodnot, proto se do zatížení vozíku neuvažují.

3.2.4 Dynamické zatížení svislé a vodorovné ve směru podélné osy:

Hodnoty dynamického zatížení jsou stanoveny z hmotností jednotlivých profilů v souladu s ČSN 27 7008 podle tabulky číslo 6 [13] pro vyvažovací výložník, aby byly zohledněny dynamické účinky ve všech směrech konstrukce.

Sloup	$q_k = 1,83 \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,13 \text{ kN/m}$
Hlavní vodorovné nosníky	$q_k = 2,25 \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,16 \text{ kN/m}$
Příčné vodorovné nosníky	$q_k = 30 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,021 \text{ kN/m}$
Vzpěry	$q_k = 44 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,031 \text{ kN/m}$

Dynamické zatížení vodorovné ve směru kolmém k podélné ose:

Sloup	$q_k = 1,83 \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,037 \text{ kN/m}$
Vodorovné nosníky	$q_k = 2,25 \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,045 \text{ kN/m}$
Příčné vodorovné nosníky	$q_k = 30 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,006 \text{ kN/m}$
Vzpěry	$q_k = 44 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,009 \text{ kN/m}$

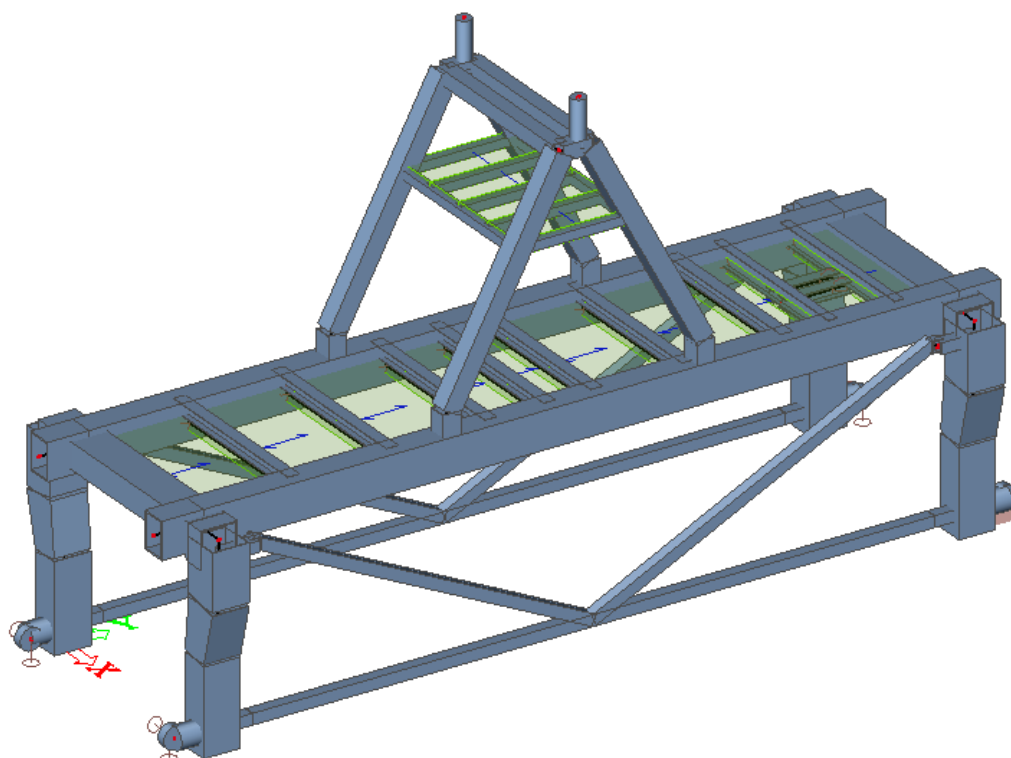
3.2.5 Numerický model vozíku

Numerický model vozíku je modelován ve statickém výpočetním software Scia Engineer v prostorovém pracovním prostředí. Model je prutový a při modelování byly zohledněny excentricity přípojí prvků a náběhy svislých nosníků. Nosníky profilu HEA160 podporující technologii jsou připojeny pomocí kloubového přípoje k příčným nosníkům, ostatní spoje se předpokládají rámové tuhé.

U vozíku může docházet k příčení vodících kol při jeho pohybu po základním mostovém nosníku, proto se u jednotlivých modelů mění umístění vazby ve směru podélném, která brání tomuto posunu. Vozík se pohybuje pomocí koles

na kolejnicích, které omezují posuny ve směru svislém (kolejnice v horní části vozíku) a kolmém k podélné ose konstrukce (vodící kola ve spodní části vozíku). Podpora konstrukce zachycující účinky v podélném směru osy vozíku se nachází v horní části vozíku v místě umístění pohonu. Výpočet modelu je proveden geometricky nelineární, což umožňuje v rámci posudků konstrukce s ohledem na stabilitní jevy využít délku prvku systémovou.

Hodnoty dílčích součinitelů v software Scia Engineer vstupujících do výpočtu kombinací zatížení jsou v software upraveny v souladu s ČSN 27 7008 pro jednotlivé skupiny zatížení a je aplikováno kombinační pravidlo dle [13].



Obr. 51: Numerický prutový model v software Scia Engineer

4. Návrh a statické posouzení konstrukce vozíku

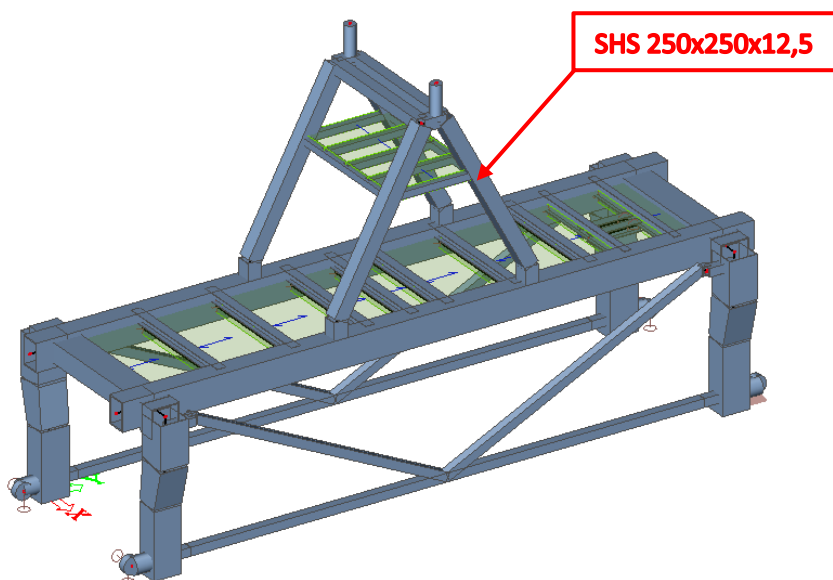
V první části statického posouzení je stanovena únosnost jednotlivých hlavních nosných částí konstrukce vozíku, v druhé části jsou posouzeny jednotlivé vybrané přípoje.

4.1 Návrh a statické posouzení nosných prvků konstrukce pro kladkostroj

Posudek konstrukce je proveden v souladu s ČSN EN 1993-1-1, nejdříve se provede posouzení horní části vozíku – konstrukce pro kladkostroj. Globální numerická analýza pro zjištění vnitřních sil v prvcích je provedena v software Scia Engineer 2015 pomocí FEM se zatížením uvedeným v kapitole 3.1.3.

4.1.1 Návrh a posudek sloupu konstrukce

Sloup konstrukce kladkostroje je navržený z uzavřeného profilu, který je tuhý na kroucení a nedochází při namáhání ohybovém ke klopení průřezu. Sloup je namáhán tlakovým osovým zatížením, je zapotřebí jej posoudit na vzpěrnou únosnost a kombinaci ohybového namáhání s osovým.



Obr. 52: Posuzovaný prvek – sloup SHS 250x250x12,5

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou sílu: NC55

$$N_{Ed,max} = -29,51 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -16,72 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 22,76 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální ohybový moment: NC132

$$N_{Ed,př} = -28,18 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -19,13 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = -20,96 \text{ kNm}$$

Hodnoty krouticích ohybových momentů M_x jsou vzhledem k ostatním hodnotám zanedbatelné.

Zatřídění průřezu SHS 250x250x12,5

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{250-2 \cdot 12,5}{12,5} = 18,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{250-2 \cdot 12,5}{12,5} = 18,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

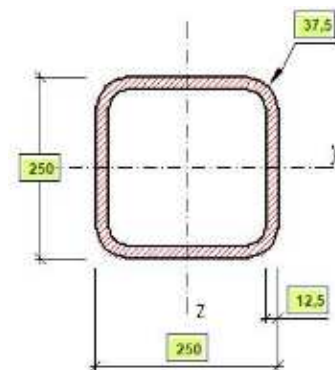
Průřezové charakteristiky sloupu

$$A = 1,17 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$i_y = i_z = 95,2 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = W_{z,pl} = 0,975 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = I_z = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$



**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC55

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 2558 \text{ mm}$$

Vzpěrná délka sloupu je vymezena podepřením spodní části sloupu a připojením svařených podporových nosníků pochozího roštu.

Vzpěr ve směru osy z-z a y-y

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2558}{95,2} = 26,87$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{26,87}{76,40} = 0,352 \quad \dots \textit{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* Uzavřený průřez je tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,352 - 0,2) + 0,352^2] = 0,599$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,599 + \sqrt{0,599^2 - 0,352^2}} = 0,923$$

$$\chi_y = 0,923 \leq 1,00 \quad \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 11,7 \cdot 10^3 \cdot 355 = 4153,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,975 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 346,13 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,975 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 346,13 \text{ kNm}$$

... konzervativně $\psi = 1,00$ pro lineární průběh momentů

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

Interakční součinitelé pro pruty, které nejsou náchylné ke zkroucení, se určily dle tabulky B. 1. v normě ČSN EN 1993-1-1 na základě zatřídění průřezu do třídy s možností využití plasticitního návrhu. V obdobných příkladech se tyto součinitelé určily pomocí vytvořené aplikace v MS Excel na posuzování prvků v případě namáhání kombinace tlakové normálové síly a ohybových momentů.

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,07$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01 \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,07$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,608$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,608$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{29,51}{\frac{0,923 \cdot 4153,50}{1,15}} + 1,01 \frac{16,72}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} + 0,601 \frac{22,76}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} \\ & = 0,089 + 0,056 + 0,045 = 0,191 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{29,51}{\frac{0,923 \cdot 4153,50}{1,15}} + 0,608 \frac{16,72}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} + 1,01 \frac{22,76}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} \\ & = 0,089 + 0,034 + 0,077 = 0,199 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{29,51}{\frac{4153,50}{1,15}} + \frac{16,72}{\frac{346,13}{1,15}} + \frac{22,76}{\frac{346,13}{1,15}} = 0,082 + 0,056 + 0,076 = 0,213 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC132

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$= \frac{28,18}{\frac{0,873 \cdot 4153,50}{1,15}} + 1,01 \frac{19,13}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} + 0,608 \frac{20,96}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}}$$

$$= 0,085 + 0,064 + 0,042 = 0,191 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{28,18}{\frac{0,873 \cdot 4153,50}{1,15}} + 0,601 \frac{19,13}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}} + 1,02 \frac{20,96}{\frac{1,0 \cdot 346,13}{1,15}}$$

$$= 0,085 + 0,039 + 0,071 = 0,194 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{28,18}{\frac{4153,50}{1,15}} + \frac{19,13}{\frac{346,13}{1,15}} + \frac{20,96}{\frac{346,13}{1,15}} = 0,078 + 0,064 + 0,070 = 0,211 \leq 1,0$$

Navržený průřez SHS 250x250x12,5 vyhovuje na kombinaci tlakové normálové síly a ohybového momentu.

4.1.2 Návrh a posudek podporového nosníku pochozího roštu

Předpokladem je, že konstrukce podporující pochozí rošty již bude vyrobena jako celek v dílně a styčníky budou svařeny. Prvek v příčném směru je posouzen na vzpěrnou únosnost, kombinaci ohybu a tlaku a na smykové namáhání.

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tlakovou sílu: NC129

$$N_{Ed,max} = -11,73 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -2,41 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -2,32 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tahovou sílu: NC132

$$N_{Ed,max} = 14,18 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = -11,73 \text{ kN}$$

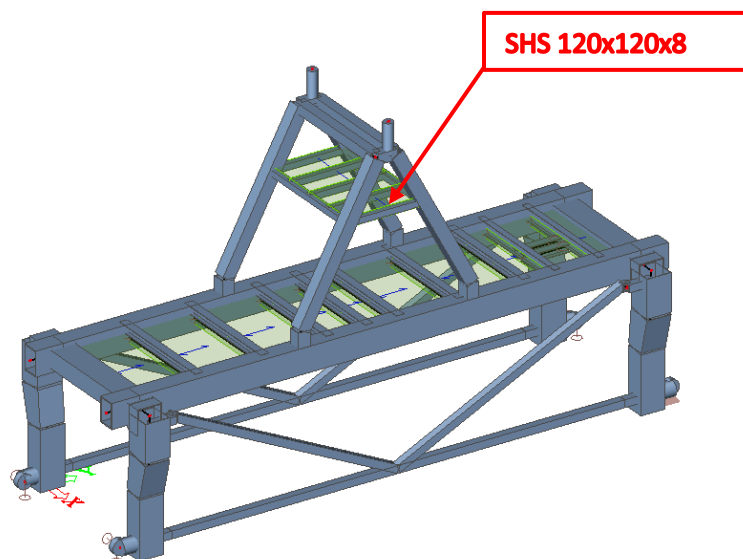
$$M_{y,Ed,př} = -2,41 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -2,32 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC49

$$V_{z,Ed,max} = 4,08 \text{ kN}$$

Hodnoty kroutících ohybových momentů M_x jsou vzhledem k ostatním hodnotám zanedbatelné.



Obr. 53: Posuzovaný prvek – SHS 120x120x8

Zatřídění průřezu SHS 120x120x8

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{120-2 \cdot 8}{8} = 13,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{120-2 \cdot 8}{8} = 13,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

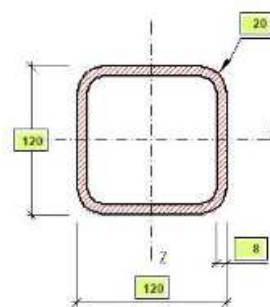
Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 3,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = i_z = 44,9 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = W_{z,pl} = 0,138 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = I_z = 6,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



*Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC129

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 800 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z a y-y

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{800}{44,9} = 17,82$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{17,82}{76,40} = 0,23 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* Uzavřený průřez je tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,23 - 0,2) + 0,23^2] = 0,534$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,534 + \sqrt{0,534^2 - 0,230^2}} = 0,984$$

$$\chi_y = 0,984 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 3,36 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1192,80 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,138 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 48,99 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,138 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 48,99 \text{ kNm}$$

$$\alpha_s = -0,688$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8\alpha_s = 1 - 0,8 \cdot (-0,688) = \mathbf{0,650} \geq 0,40$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = \mathbf{1,0} \geq 0,4$$

$$k_{yy} = 0,657$$

$$k_{zz} = 1,010$$

$$k_{yz} = 0,600$$

$$k_{zy} = 0,394$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{11,73}{0,984 \cdot 1192,8}}{1,15} + 0,657 \frac{\frac{2,41}{1,0 \cdot 48,99}}{1,15} + 0,600 \frac{\frac{2,32}{1,0 \cdot 48,99}}{1,15} = 0,012 + 0,037 + 0,033 \\ & = 0,082 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{11,73}{0,984 \cdot 1192,8}}{1,15} + 0,374 \frac{\frac{2,41}{1,0 \cdot 48,99}}{1,15} + 1,01 \frac{\frac{2,32}{1,0 \cdot 48,99}}{1,15} = 0,012 + 0,021 + 0,054 \\ & = 0,087 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{11,73}{1192,80}}{1,15} + \frac{\frac{2,41}{48,99}}{1,15} + \frac{\frac{2,32}{48,99}}{1,15} = 0,011 + 0,057 + 0,054 = 0,122 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Navržený průřez SHS 120x120x8 vyhovuje na kombinaci tlakové normálové síly a ohybového momentu.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tahové síly pro kombinaci NC132

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$
$$\frac{14,18}{\frac{1192,80}{1,15}} + \frac{2,41}{\frac{48,99}{1,15}} + \frac{2,32}{\frac{48,99}{1,15}} = 0,014 + 0,057 + 0,054 = 0,125 \leq 1,0$$

Navržený průřez SHS 120x120x8 vyhovuje na kombinaci tahové normálové síly a ohybového momentu.

Posudek na smyk pro kombinaci NC49

V souladu s ČSN EN 1993-1-1 dle kapitoly 6.2.6 se smyková plocha pro pravoúhlé duté průřezy s konstantní tloušťkou určí dle vztahu:

$$A_v = \frac{A \cdot b}{(b + h)} = \frac{3,36 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12}{(0,12 + 0,12)} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 299,42 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 299,42 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 4,008 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 299,42 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 4,08 = 8,16 \text{ kN}$$

Navržený průřez SHS 120x120x8 vyhovuje na působení smykové síly.

4.1.3 Návrh a posudek vodorovného nosníku v horní části konstrukce

Vodorovný nosník v příčném směru konstrukce kladkostroje je namáhaný tahem, je zapotřebí uzavřený nosník SHS 200x200x10 posoudit na prostý tah a na kombinaci ohybového namáhání s tahovými osovými vnitřními silami. Velikost krouticího momentu nosníku je zanedbatelná.

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou sílu: NC134

$$N_{Ed,max} = 9,11 \text{ kN} \dots \text{tah}$$

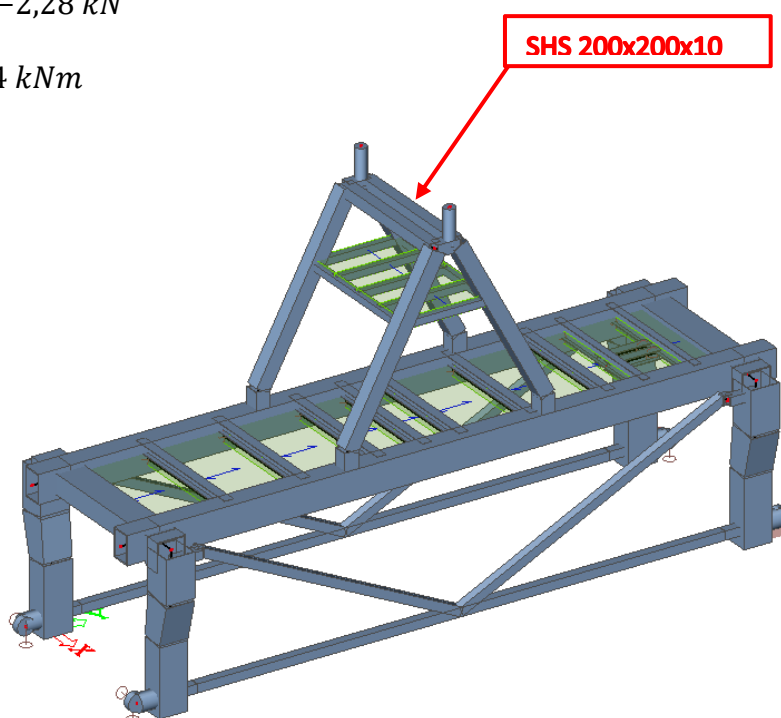
$$M_{y,Ed,př} = -3,38 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 3,02 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC54

$$V_{z,Ed,max} = -2,28 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,př} = 0,24 \text{ kNm}$$



Obr. 54: Posuzovaný prvek – SHS 200x200x10

Zatřídění průřezu SHS 200x200x10

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{200-2 \cdot 10}{10} = 18,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{200-2 \cdot 10}{10} = 18,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

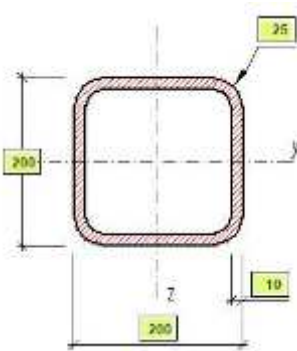
Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = i_z = 76,5 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = W_{z,pl} = 0,508 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = I_z = 42,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



*Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tahové síly pro kombinaci NC134

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1} M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} M_{z,Rd}} = \\ & = \frac{9,11}{\frac{2577,30}{1,15}} + \frac{3,38}{\frac{180,34}{1,15}} + \frac{3,02}{\frac{180,34}{1,15}} = 0,004 + 0,022 + 0,019 = 0,045 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Navržený průřez SHS 200x200x10 vyhovuje na kombinaci tahové normálové síly a ohybového momentu.

Posudek kombinace smykové síly a krouticího momentu pro kombinaci NC54

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot b}{(b + h)} = \frac{7,26 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2}{(0,2 + 0,2)} = 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{3,63 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 646,96 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 646,96 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2,28 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 646,96 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 2,28 = 4,56 \text{ kN}$$

Průřez SHS 200x200x10 mm vyhovuje na prostý smyk.

Prosté kroucení

$$A_s = (200 - 8) \cdot (200 - 8) = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_t = 2 \cdot t \cdot A_s = 2 \cdot 0,01 \cdot 36,8 \cdot 10^{-3} = 7,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\tau_{Ed} = \frac{T_{Ed}}{W_t} = \frac{240}{7,36 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-6} = 0,33 \text{ MPa}$$

$$T_{Rd} = \frac{W_t \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{7,36 \cdot 10^{-4} \cdot 355}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 = 131,17 \text{ kNm}$$

$$T_{Rd} = 131,17 \text{ kNm} \geq T_{Ed} = 0,33 \text{ kNm}$$

Průřez SHS 200x200x10 mm vyhovuje na prosté volné kroucení.

Kombinace smykové síly a krouticího momentu

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \right)} \right] \cdot V_{pl,Rd} = \left[1 - \frac{330 \cdot 10^3}{\left(\frac{355 \cdot 10^6}{\sqrt{3}} \right)} \cdot \frac{1}{1,15} \right] \cdot 646,96 = 645,76 \text{ kN}$$

$$V_{pl,T,Rd} = 645,76 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2,28 \text{ kN}$$

Průřez SHS 200x200x10 mm vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

4.2 Návrh a posudek styčníků konstrukce pro kladkostroj

V této podkapitole je proveden posudek jednotlivých styčníků, vždy nejvíce namáhaného reprezentujícího styčnicku s ohledem na styčnický v konstrukci podobného statického schématu a řešení.

4.2.1 Návrh a posudek svařovaného T-styčnicku podporových nosníků pochozího roštu

Posudek nejvíce namáhaného pravoúhlého svařovaného T-styčnicku je proveden dle ČSN EN 1993-1-8 tabulky 7.11.

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou sílu: NC78

$$N_{i,Ed,max} = -13,29 \text{ kN}$$

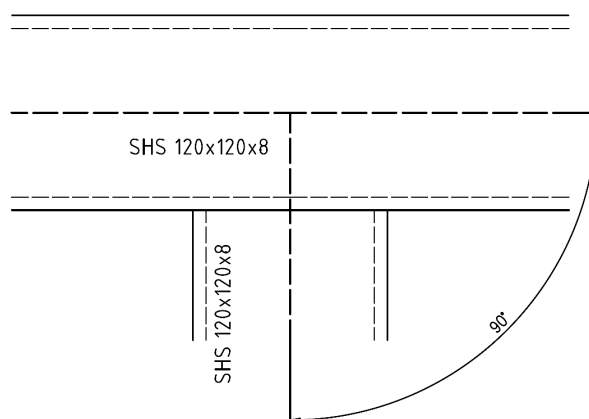
$$M_{y,i,Ed,př} = -0,88 \text{ kNm}$$

$$M_{z,i,Ed,př} = 2,16 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = 9,11 \text{ kN}$$

$$M_{y,0,Ed,př} = 3,38 \text{ kNm}$$

$$M_{z,0,Ed,př} = 3,02 \text{ kNm}$$



Obr. 55: Schéma posuzovaného T-styčníku

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{120}{120} = 1,00 \geq 0,85$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 13,29 - 0 = 13,29 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{-9,11 \cdot 10^3}{3,36 \cdot 10^{-3}} + \frac{3,38 \cdot 10^3}{138 \cdot 10^{-6}} + \frac{3,02 \cdot 10^3}{138 \cdot 10^{-6}} = 43,66 \text{ MPa}$$

$$n_n = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{43,66}{355} = 0,12 \leq 0,00$$

$$k_n \cong 1,00$$

Vybočení boční stěny pásu

$$N_{i,Rd} = \frac{\frac{f_b \cdot t_0}{\sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,008}{\sin(90^\circ)} \left(\frac{2 \cdot 0,200}{\sin(90^\circ)} + 10 \cdot 0,008 \right)}{1,00} = 1363,20 \text{ kN}$$

$$N_{i,Rd} = 1363,20 \text{ kN} \geq N_{i,Ed,max} = 13,29 \text{ kN}$$

Vyhovuje na vybočení boční stěny.

Porušení mezipásového prutu

$$b_{eff} = \frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} b_i = \frac{10}{\frac{120}{8}} \frac{355 \cdot 8}{355 \cdot 8} 120 = 80 \text{ mm} \leq b_i = 120 \text{ mm}$$

$$N_{i,Rd} = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) =$$

$$= 355 \cdot 10^6 \cdot 0,008 \cdot (2 \cdot 0,12 - 4 \cdot 0,008 + 2 \cdot 0,08) = 1045,12 \text{ kN}$$

$$N_{i,Rd} = 1045,12 \text{ kN} \geq N_{i,Ed,max} = 13,29 \text{ kN}$$

Vyhovuje na porušení mezipásového prutu.

Prolomení smykem

$$b_{e,p} = \frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} b_i = \frac{10}{\frac{120}{8}} 120 = 80 \text{ mm} \leq b_i = 120 \text{ mm}$$

$$N_{i,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + 2b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,008}{\sqrt{3} \sin(90^\circ)} \left(\frac{2 \cdot 0,12}{\sin(90^\circ)} + 2 \cdot 0,08 \right)}{1,00}$$

$$= 419,76 \text{ kN}$$

$$N_{i,Rd} = 419,76 \text{ kN} \geq N_{i,Ed,max} = 13,29 \text{ kN}$$

Vyhovuje na prolomení smykem.

Momentová únosnost pro momenty v rovině

Porušení boční stěny

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 f_{yk} \cdot t_0 (h_1 + 5t_0)^2}{\gamma_{M5}} = \frac{0,5 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,008 \cdot (0,12 + 5 \cdot 0,008)^2}{1,00}$$

$$= 36,35 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right) b_1 \cdot h_1 \cdot t_1 \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \left(138 \cdot 10^{-6} - \left(1 - \frac{0,08}{0,12} \right) 0,12 \cdot 0,12 \cdot 0,008 \right)}{1,00} = 35,358 \text{ kNm}$$

Momentová únosnost pro momenty z roviny

Porušení boční stěny pásu

$$M_{0p,1,Rd} = \frac{f_{yk} \cdot t_0 (b_0 - t_0) (h_1 + 5t_0)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,008 (0,12 - 0,008) (0,12 + 5 \cdot 0,008)}{1,00} = 50,892 \text{ kNm}$$

Porušení pásu zkroucením

$$M_{0p,1,Rd} = \frac{2 \cdot f_{yk} \cdot t_0 (b_0 \cdot t_0 + \sqrt{b_0 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot (b_0 + h_0)})}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,008 \left(0,12 \cdot 0,008 + \sqrt{0,12 \cdot 0,12 \cdot 0,008 \cdot (0,12 + 0,1)} \right)}{1,00}$$

$$= 35,319 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$M_{0p,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - 0,5 \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right)^2 b_1^2 \cdot t_1 \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \left(138 \cdot 10^{-6} - 0,5 \left(1 - \frac{0,08}{0,12} \right)^2 0,12^2 \cdot 0,008 \right)}{1,00} = 46,718 \text{ kNm}$$

Posudek ohybového momentu v rovině

$$M_{ip,1,Rd} = \min(36,350; 35,358) = 35,358 \text{ kNm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = 35,358 \text{ kNm} \geq M_{z,i,Ed,př} = 0,88 \text{ kNm}$$

Posudek ohybového momentu z roviny

$$M_{0p,1,Rd} = \min(50,892; 35,319; 46,718) = 35,319 \text{ kNm}$$

$$M_{0p,1,Rd} = 35,319 \text{ kNm} \geq M_{y,i,Ed,př} = 2,16 \text{ kNm}$$

Posudek na kombinaci ohybového momentu a osově síly

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} + \frac{M_{op,1,Ed}}{M_{op,1,Rd}} \leq 1,0$$

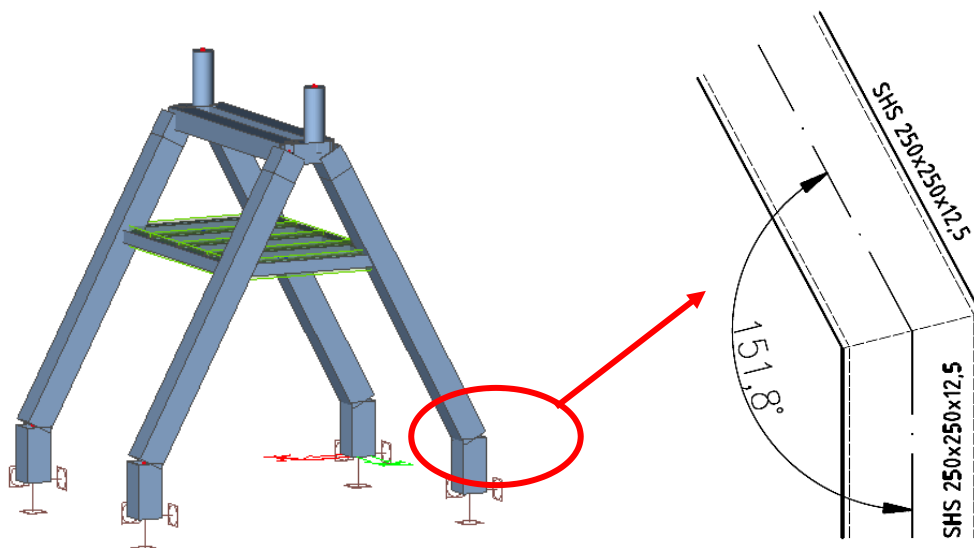
$$\frac{13,29}{419,76} + \frac{0,88}{35,358} + \frac{2,32}{35,319} \leq 1,0$$

$$0,032 + 0,025 + 0,066 = 0,123 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje.

4.2.2 Návrh a posudek svařovaného zalomeného styčníku

Posudek zalomeného styčníku konstrukce kladkostroje je proveden v souladu s ČSN EN 1993-1-8 tabulkou 7.16.



Obr. 56: Posuzovaný zalomený styčník sloupu konstrukce kladkostroje

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou sílu: NC67

$$N_{Ed,max} = -29,51 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -19,13 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 22,79 \text{ kNm}$$

Únosnosti průřezu

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y = 11,7 \cdot 10^3 \cdot 355 = 4153,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,975 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 346,13 \text{ kNm}$$

$$M_{z,pl,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,975 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 346,13 \text{ kNm}$$

Posudek normálové síly

$$N_{Ed} \leq 0,2 \cdot N_{pl,Rd}$$

$$N_{Ed} = 29,51 \text{ kN} \leq 0,2 \cdot 4153,50 = 830,70 \text{ kN}$$

Splněno.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové síly

Koeficient κ_{90° pro $\theta = 90^\circ$:

$$\kappa_{90^\circ} = \frac{3 \sqrt{\frac{b_0}{h_0}}}{\left[\frac{b_0}{h_0}\right]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{b_0}{h_0}} = \frac{3 \sqrt{\frac{250}{250}}}{\left[\frac{250}{250}\right]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{250}{250}} = 3,33$$

Koeficient $\kappa_{151,8^\circ}$ pro $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$:

$$\kappa_{151,8^\circ} = 1 - \left(\sqrt{2} \cos \frac{\theta}{2} \right) (1 - \kappa_{90^\circ}) = 1 - \left(\sqrt{2} \cos \frac{151,8}{2} \right) (1 - 3,33) = 1,803$$

$$\frac{N_{pl,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,pl,Ed}}{M_{y,pl,Rd}} + \frac{M_{z,pl,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} \leq \kappa$$

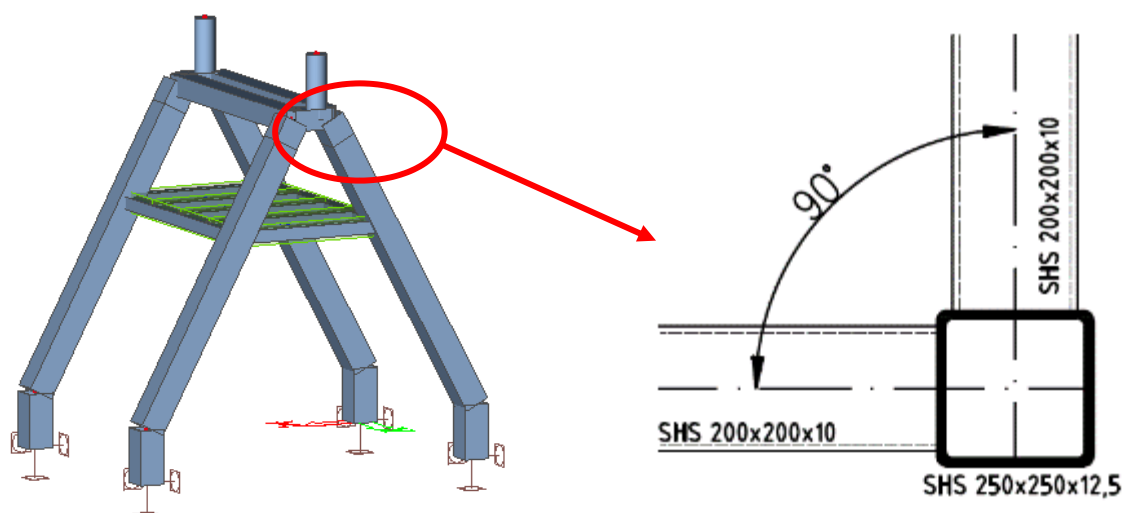
$$\frac{29,51}{4153,50} + \frac{19,13}{346,13} + \frac{22,79}{346,13} \leq \kappa$$

$$0,07 + 0,055 + 0,066 = 0,191 \leq 1,803$$

Zalomený styčník vyhovuje.

4.2.3 Návrh a posudek svařovaného zalomeného styčníku

Posudek prostorového styčníku konstrukce kladkostroje je proveden v souladu s ČSN EN 1993-1-8 tabulkou 7.19 a tabulkou 7.11 [10].



Obr. 57: Posuzovaný svařovaný prostorový styčník konstrukce kladkostroje

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou sílu: NC67

$$N_{1,Ed,max} = 9,11 \text{ kN}$$

$$M_{y,1,Ed,př} = -3,38 \text{ kNm}$$

$$M_{z,1,Ed,př} = 3,02 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = -18,00 \text{ kN}$$

$$M_{y,0,Ed,př} = -1,01 \text{ kNm}$$

$$M_{z,0,Ed,př} = -2,5 \text{ kNm}$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{200}{250} = 0,8 \leq 0,85$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 9,11 - 0 = 9,11 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pl}} = \frac{-9,11 \cdot 10^3}{7,26 \cdot 10^{-3}} + \frac{-1,05 \cdot 10^3}{508 \cdot 10^{-6}} + \frac{-2,50 \cdot 10^3}{508 \cdot 10^{-6}} = -8,24 \text{ MPa}$$

$$n_n = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{-8,24}{355} = -0,023 \geq 0,00$$

$$k_n \cong 1,00$$

Redukční součinitel pro prostorový styčník $\mu = 0,9$.

Porušení povrchu pásu

$$N_{i,Rd} = \frac{\frac{f_b \cdot k_n \cdot t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \left(\frac{2n_n}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 1,00 \cdot 0,0125^2}{(1 - 0,8) \sin(90^\circ)} \left(\frac{2 \cdot 0,196}{\sin(90^\circ)} + 4\sqrt{1 - 0,80} \right)}{1,00} = 575,923 \text{ kN}$$

$$N_{i,Rd} \cdot \mu = 575,923 \cdot 0,9 = 518,33 \text{ kN} \geq N_{i,Ed,max} = 9,11 \text{ kN}$$

Vyhovuje na vybočení boční stěny.

Prolomení smykem

$$b_{e,p} = \frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} b_i = \frac{10}{\frac{250}{12,5}} 200 = 100 \text{ mm} \leq b_i = 200 \text{ mm}$$

$$N_{i,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,0125}{\sqrt{3} \sin(90^\circ)} \left(\frac{2 \cdot 0,2}{\sin(90^\circ)} + 2 \cdot 0,100 \right)}{1,00}$$

$$= 1537,195 \text{ kN}$$

$$N_{i,Rd} \cdot \mu = 1537,195 \cdot 0,9 = 1383,48 \text{ kN} \geq N_{i,Ed,max} = 9,11 \text{ kN}$$

Vyhovuje na prolomení smykem.

Momentová únosnost pro momenty v rovině

Porušení boční stěny

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 f_{yk} \cdot t_0 (h_1 + 5t_0)^2}{\gamma_{M5}} = \frac{0,5 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,0125 \cdot (0,2 + 5 \cdot 0,0125)^2}{1,00}$$

$$= 152,885 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$b_{eff} = \frac{10}{\frac{b_0}{t_0}} \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} b_i = \frac{10}{\frac{250}{12,5}} \frac{355 \cdot 12,5}{355 \cdot 10} 200 = 125 \text{ mm} \leq b_i = 200 \text{ mm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right) b_1 \cdot h_1 \cdot t_1 \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \left(508 \cdot 10^{-6} - \left(1 - \frac{0,125}{0,2} \right) 0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,010 \right)}{1,00} = 27,051 \text{ kNm}$$

Momentová únosnost pro momenty z roviny

Porušení boční stěny pásu

$$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{yk} \cdot t_0 (b_0 - t_0) (h_1 + 5t_0)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,0125 (0,25 - 0,0125) (0,2 + 5 \cdot 0,0125)}{1,00} = 276,650 \text{ kNm}$$

Porušení pásu zkroucením

$$M_{op,1,Rd} = \frac{2 \cdot f_{yk} \cdot t_0 (b_0 \cdot t_0 + \sqrt{b_0 \cdot h_0 \cdot t_0 \cdot (b_0 + h_0)})}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,0125 \left(0,25 \cdot 0,0125 + \sqrt{0,25 \cdot 0,25 \cdot 0,0125 \cdot (0,25 + 0,25)} \right)}{1,00}$$

$$= 203,141 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - 0,5 \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right)^2 b_1^2 \cdot t_1 \right)}{\gamma_{M5}} =$$

$$= \frac{355 \cdot 10^6 \left(508 \cdot 10^{-6} - 0,5 \left(1 - \frac{0,125}{0,2} \right)^2 0,2^2 \cdot 0,010 \right)}{1,00} = 170,355 \text{ kNm}$$

Posudek ohybového momentu v rovině

$$M_{ip,1,Rd} = \min(27,051; 152,885) = 27,051 \text{ kNm}$$

$$M_{ip,1,Rd} \cdot \mu = 27,051 \cdot 0,9 = 24,346 \text{ kNm} \geq M_{z,i,Ed,př} = 3,02 \text{ kNm}$$

Posudek ohybového momentu z roviny

$$M_{op,1,Rd} = \min(276,650; 203,141; 170,355) = 170,355 \text{ kNm}$$

$$M_{ip,1,Rd} \cdot \mu = 170,355 \cdot 0,9 = 153,319 \text{ kNm} \geq M_{y,i,Ed,př} = 3,38 \text{ kNm}$$

Posudek na kombinaci ohybového momentu a osově síly

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} + \frac{M_{op,1,Ed}}{M_{op,1,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{9,11}{518,33} + \frac{3,38}{24,346} + \frac{3,02}{153,355} \leq 1,0$$

$$0,018 + 0,139 + 0,020 = 0,177 \leq 1,0$$

Styčnick vyhovuje.

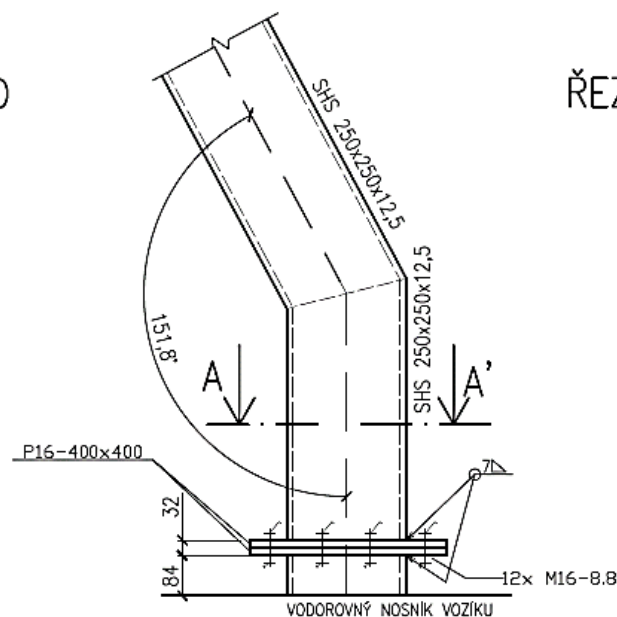
4.2.4 Návrh a posudek montážního spoje sloupu konstrukce kladkostroje

Z důvodu snadnější montáže se konstrukce kladkostroje svaří celá v dílně a na konstrukci vozíku se přišroubuje na připravený navařený krátký prvek na podélných nosnících pomocí spoje s čelní deskou. Posudek tohoto spoje je proveden podle metody komponent dle ČSN EN 1993-1-8. Montážní spoj je umístěn ve výšce 84 mm na vodorovném nosníku konstrukce a šrouby se při montáži předepnout z důvodu dynamických účinků při pracovním procesu konstrukce.

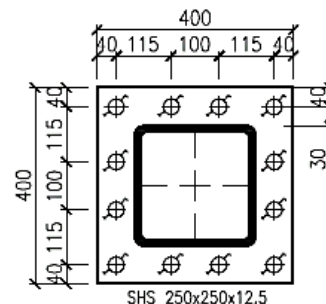
Montážní spoj je navržen jako kontaktní s opracovanými styčnými plochami. Tlaková síla ve sloupu se přenáší kontaktem dvou čelních desek, šrouby jsou namáhány tahem od ohybu a čelní deska ohybem.

Navržené šrouby jsou pevnostní třídy 8.8. průměru 16 mm a jejich umístění splňuje požadavky na minimální rozteče (vzdálenosti šroubů) dle ČSN 1993-1-8. Jelikož se jedná o konstrukci dynamicky namáhanou, předpokládá se použití předepnutých šroubů.

POHLED



ŘEZ A-A'



Obr. 58: Montážní spoj kladkostroje

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = -29,51 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 10,73 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = -19,13 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 22,79 \text{ kNm}$$

Tlaková síla se přenáší kontaktem. Únosnost v obou směrech pro namáhání ohybovými momenty se stanoví s použitím únosnosti náhradního T-profilu.

Návrh svaru

Účinná tloušťka svaru je navržena konzervativně na plnou únosnost.

$$a \geq 0,55 \cdot t_w = 0,55 \cdot 12,5 = 6,875 \text{ mm}$$

$$a = 7,00 \text{ mm}$$

Stanovení nejmenší tloušťky, při které nedochází k páčení:

$$t_e = 4,3 \left(\frac{b \cdot d^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{30 \cdot 16^2}{40} \right)^{\frac{1}{3}} = 24,81 \text{ mm} \geq 16 \text{ mm}$$

Musí se posoudit vliv páčení.

$$\gamma_P = 1 + 0,005 \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \frac{24,81^3 - 16^3}{16^2} = 1,22$$

Stanovení náhradního T-profilu

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu SHS profilu).

Čelní deska v ohybu

1. Řada šroubu

$$m_{p1} = 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 7 = 22,08 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 100 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 22,08 = 138,73 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 22,08 + 1,25 \cdot 40 = 138,32 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 22,08 + 0,5 \cdot 100 = 119,37 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 22,08 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 100 = 119,16 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{138,73; 138,32; 119,39; 119,16\} = 119,16 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 119,16 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,35 \cdot 10^6}{22,08} \cdot 10^{-3} = 212,86 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 119,16 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 22,08) = 27,6 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,35 \cdot 10^6 + 27,6 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{22,08 + 27,60} \cdot 10^{-3} = 95,608 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{212,86; 95,608; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 3.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 119,16 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{119,16 \cdot 12,5 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 459,80 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{86,95; 459,80\} = 86,95 \text{ kN}$$

2. Řada šroubu

$$m_{p1} = 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 7 = 22,08 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 100 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 22,08 = 138,73 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 22,08 + 1,25 \cdot 40 = 138,32 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 22,08 + 0,5 \cdot 100 = 119,37 \text{ mm}$$

$$L_{eff,34} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 22,08 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 100 \\ = 119,16 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{138,73; 138,32; 119,39; 119,16\} = 119,16 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 119,16 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,35 \cdot 10^6}{22,08} \cdot 10^{-3} = 212,86 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 119,16 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 22,08) = 27,6 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,35 \cdot 10^6 + 27,6 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{22,08 + 27,60} \cdot 10^{-3} = 95,608 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{212,86; 95,608; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 3.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 119,16 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{119,16 \cdot 12,5 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 459,80 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{86,95; 459,80\} = 86,95 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{y,j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 2 \cdot 86,95 \cdot 10^3 \cdot (68,75 + 168,75) \cdot 10^{-6} = \\ = 41,30 \text{ kNm}$$

$$M_{y,j,Rd} = 41,30 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 19,13 \text{ kNm}$$

$$M_{y,j,Rd} = M_{z,j,Rd} = 41,30 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 22,79 \text{ kNm}$$

Styčník vyhovuje na ohybovou únosnost v obou směrech.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otlačení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{100}{3 \cdot 18} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 1,60 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{40}{18} \\ 1,4 \frac{100}{18} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 6,22 \\ 6,07 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = 48,31 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 10,73 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na namáhání posouvající silou.

Odolnost proti prokluzu

$$F_{p,cd} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87,92 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot (F_{p,cd} - 0,8 F_{t,sd})}{\gamma_{Ms}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot (87,92 - 0,8 \cdot 2,46 \cdot 1,22)}{1,30} \\ = 32,89 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 10,73 \text{ kN}$$

Odolnost v protlačení

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{27,7 + 24}{2} = 25,85 \text{ mm}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 0,02585 \cdot 0,016 \cdot 510 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} \\ = 305,85 \text{ kN} \geq F_{t,Rd} = 2,46 \cdot 1,22 = 3,00 \text{ kN}$$

4.3 Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce pro kladkostroj

V této kapitole je proveden posudek konstrukce pro kladkostroj s ohledem na splnění požadavků mezního stavu použitelnosti. Výsledné přetvoření, které vzniká od působení dynamického a provozního zatížení na konstrukci musí splňovat limity deformací v souladu s ČSN EN 1993-1-1. Pro posouzení MSP jsou v software Scia Engineer uvažovány dílčí součinitelé zatížení v hodnotě 1,00. Posuzovaný průhyb je stanovený z charakteristického proměnného zatížení působícího na konstrukci kladkostroje.

4.3.1 Vodorovné prvky

- Nosník tvořící podporu pochozímu roštu v podélném směru konstrukce SHS 120x120x8:

$$l = 2400 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,60 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,6 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,60 \text{ mm}$$

Vodorovné podélné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

- Nosník tvořící podporu pochozímu roštu v příčném směru konstrukce SHS 120x120x8:

$$l = 1545 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,60 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{1545}{250} = 6,18 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 6,18 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,60 \text{ mm}$$

Vodorovné příčné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

- Nosník v horní části kladkostroje SHS 250x250x12,5:

$$l = 2400 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,60 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,5 \text{ mm}$$

Vodorovné příčné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

4.3.2 Svislé prvky

- Sloup konstrukce kladkostroje

$$l = 3885 \text{ mm}$$

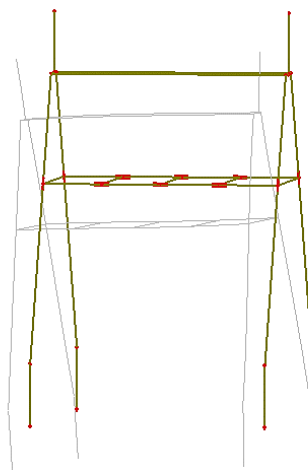
$$\delta_{x,max} = 2,00 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 4,60 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{3885}{250} = 15,54 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 15,54 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 4,60 \text{ mm}$$

Sloupy vyhovují na deformaci.



Obr. 59: 3D deformovaná konstrukce kladkostroje

4.4 Návrh a posudek konstrukce vozíku

Posudek konstrukce je proveden v souladu s ČSN EN 1993-1-1. Globální numerická analýza pro zjištění vnitřních sil v prvcích je provedena v software Scia Engineer 2015 pomocí FEM se zatížením uvedeným v kapitole 3.2.1. Konstrukce kladkostroje je připojena ke konstrukci vozíku pomocí montážního šroubového spoje s čelními deskami. Na konstrukci vozíku je přivařena část sloupu horní části konstrukce, svar je navržen na plnou únosnost účinné tloušťky 7 mm.

Podporové příčné nosníky pod pochozím roštem jsou připojeny pomocí svarového přípoje k hlavnímu vodorovnému nosníku vozíku z důvodu montážních, šroubový přípoj by nebylo možné k uzavřenému profilu provést. Na konstrukci se nachází motory, jejíž zatížení bylo předepsáno technologem a bylo odečteno z poskytnuté výkresové dokumentace [20].

4.4.1 Návrh a posudek podporových nosníků pod pochozím roštem

Příčný nosník, který vytváří roznášecí a podpůrnou konstrukci pod pochozími rošty vozíku, které roznáší zatížení v podélném směru celé konstrukce. Nosník je navržen z profilu IPE120 a je připojený rámově k hlavnímu vodorovnému nosníku konstrukce.

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tlakovou sílu: NC233

$$N_{Ed,max} = -13,05 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -1,67 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -0,13 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tahovou sílu: NC132

$$N_{Ed,max} = 15,57 \text{ kN}$$

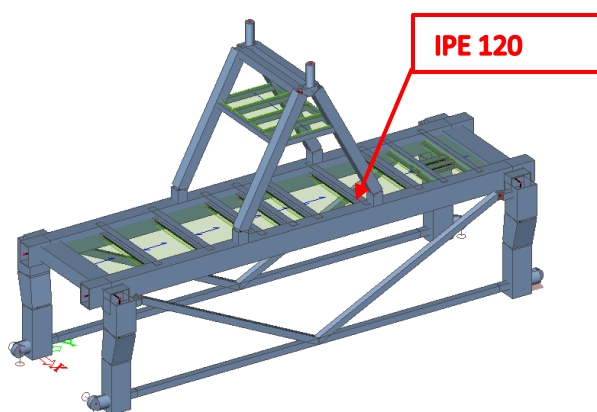
$$M_{y,Ed,př} = -1,78 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -0,13 \text{ kNm}$$

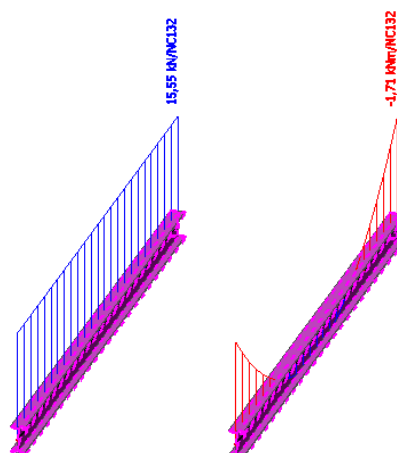
Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC133

$$V_{z,Ed,max} = 3,32 \text{ kN}$$

Velikost krouticího momentu je zanedbatelná.



Obr. 60: Posuzovaný prvek – IPE 120



Obr. 61: Průběhy vnitřních sil pro kombinaci s maximální tahovou silou
Zatřídění průřezu IPE120

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{93}{4,4} = 21,14 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{93}{4,4} = 21,14 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{\frac{64}{2}-7}{6,3} = 3,97 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 49 \text{ mm}$$

$$i_z = 14,5 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 0,0607 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

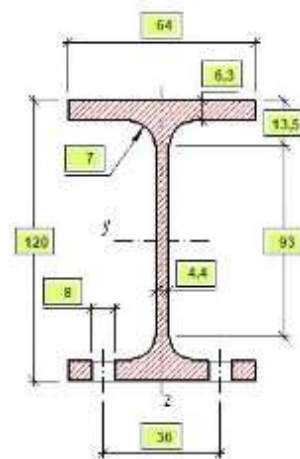
$$W_{pl,z} = 0,0136 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 3,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,277 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_t = 17,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$I_w = 890 \cdot 10^6 \text{ mm}^6$$



Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC233

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 2400 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2400}{49} = 48,98$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{48,98}{76,40} = 0,641 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{120}{64} = 1,88 \geq 1,2 \text{ a } t_f = 6,3 \leq 40 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,641 - 0,2) + 0,641^2] = 0,752$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,641^2}} = 0,873$$

$$\chi_y = 0,873 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2400}{14,5} = 165,52$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{165,52}{76,40} = 2,166 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{b} \quad \alpha = 0,34$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (2,166 - 0,2) + 2,166^2] = 3,180$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,180 + \sqrt{3,180^2 - 2,166^2}} = 0,182$$

$$\chi_z = 0,182 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 0,5$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{0,5 \cdot 2,4} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 890 \cdot 10^6 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 17,4 \cdot 10^{-9}}} = 0,953$$

$$C_1 = 1,00$$

$$C_2 = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,00}{0,5} \left[\sqrt{1 + 0,953^2} \right] = 2,763$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 2,763 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 277 \cdot 10^3 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 17,4 \cdot 10^3}}{2400} =$$

$$= 32,74 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda_{LT}} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{60,7 \cdot 10^3 \cdot 355}{32,74 \cdot 10^6}} = 0,811 \dots \text{ křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{120}{64} = 1,88 \leq 2,0$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda_{LT}} - 0,2) + \overline{\lambda_{LT}}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,811 - 0,2) + 0,811^2] = 0,89$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda_{LT}}^2}} = \frac{1}{0,893 + \sqrt{0,893^2 - 0,811^2}} = 0,789$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 468,6 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,0607 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 21,549 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,0136 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 4,828 \text{ kNm}$$

$$\alpha_s = \frac{0,33}{-1,75} = -0,189$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8\alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,189) = 0,251 \leq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = 0,4$$

$$k_{zz} = 1,0$$

$$k_{yz} = 0,6$$

$$k_{zy} = 0,24$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{13,05}{\frac{0,873 \cdot 468,6}{1,15}} + 0,4 \frac{1,67}{\frac{0,789 \cdot 21,549}{1,15}} + 0,6 \frac{0,13}{\frac{4,828}{1,15}} = \\ & = 0,037 + 0,045 + 0,019 = 0,101 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{13,05}{\frac{0,182 \cdot 468,6}{1,15}} + 0,24 \frac{1,67}{\frac{0,789 \cdot 21,549}{1,15}} + 1,0 \frac{0,13}{\frac{4,828}{1,15}} = \\ & = 0,176 + 0,027 + 0,031 = 0,234 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{13,05}{\frac{468,6}{1,15}} + \frac{1,67}{\frac{21,549}{1,15}} + \frac{0,13}{\frac{4,828}{1,15}} = 0,032 + 0,113 + 0,031 = 0,176 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tahové síly pro kombinaci NC132

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{15,57}{\frac{468,6}{1,15}} + \frac{1,78}{\frac{21,549}{1,15}} + \frac{0,13}{\frac{4,828}{1,15}} = 0,038 + 0,095 + 0,031 = 0,164 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Podporový nosník pod pochozím roštem IPE 120 vyhovuje na kombinaci namáhání tahovou normálovou silou a ohybovým momentem.

Posudek na smyk

$$A_{vz} = 6,31 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

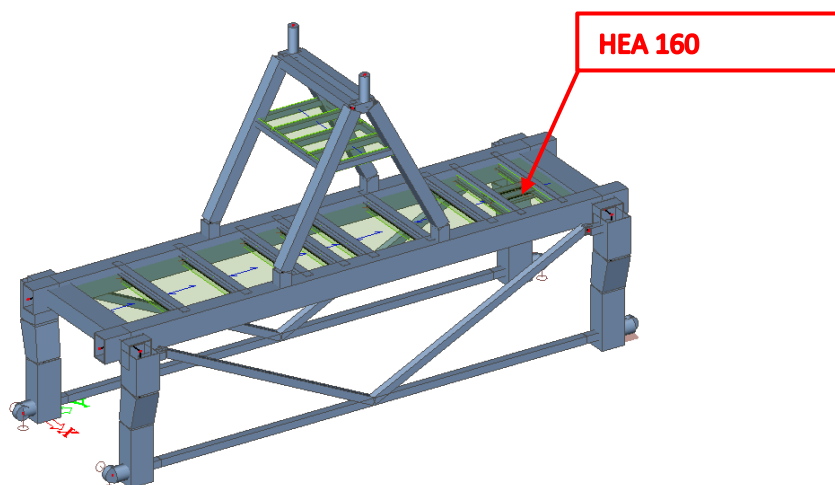
$$V_{Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{6,31 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 112,46 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 112,46 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 3,32 \text{ kN}$$

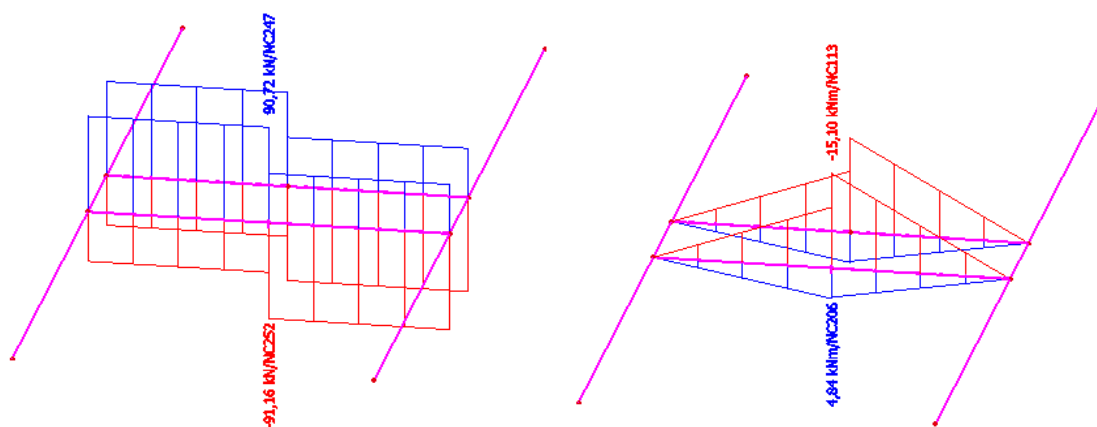
Nosník jistě vyhovuje na namáhání smykem.

4.4.2 Návrh a posudek podporových nosníku pod motorem

Nosník HEA 160 tvoří podpůrnou konstrukci pro uložení motoru na konstrukci vozíku.



Obr. 62: Posuzovaný prvek – HEA 160



Obr. 63: Průběh vnitřních sil na nosníku HEA 160 (vlevo N, vpravo My)

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tlakovou sílu: NC252

$$N_{Ed,max} = -91,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 15,20 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou tahovou sílu: NC247

$$N_{Ed,max} = 90,45 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 14,82 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální normálovou sílu: NC114

$$V_{z,Ed,max} = 33,77 \text{ kN}$$

Velikost krouticího momentu je nulová.

Zatřídění průřezu HEA160

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{104}{6} = 17,33 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{104}{6} = 17,33 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{\frac{160}{2} - 15 - 3}{9} = 6,88 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 3,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

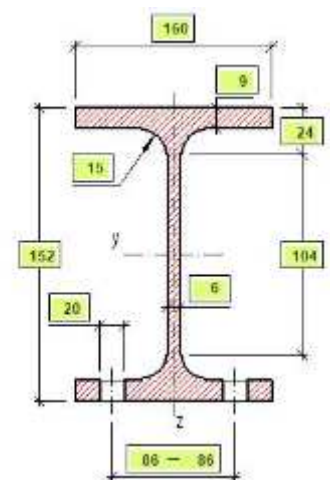
$$i_y = 65,7 \text{ mm}$$

$$i_z = 39,8 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 0,245 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} = 0,118 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



$$I_z = 6,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_t = 122 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$I_w = 31,4 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC252

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 900 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{900}{65,7} = 13,70$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{13,70}{76,40} = 0,179 \leq 0,2 \quad \dots \text{účinky vzpěru lze zanedbat}$$

$$\chi_y = 1,00$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{900}{39,8} = 22,61$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{22,61}{76,40} = 0,296 \quad \dots \text{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

$$* \text{Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{152}{160} = 0,95 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 9 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_z - 0,2) + \overline{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,296 - 0,2) + 0,296^2] = 0,567$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,567 + \sqrt{0,567^2 - 0,296^2}} = 0,952$$

$$\chi_z = 0,952 \leq 1,00 \quad \dots \text{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 0,9} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 31,4 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 122 \cdot 10^{-9}}} = 9,09$$

$$C_1 = 1,00$$

$$C_2 = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,00}{1,00} \left[\sqrt{1 + 9,09^2} \right] = 9,14$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 9,14 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 616 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 122 \cdot 10^3}}{900} =$$

$$= 36,07 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{245 \cdot 10^3 \cdot 355}{36,07 \cdot 10^8}} = 0,155 \leq 0,4 \dots \text{ lze zanedbat klopení}$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 3,88 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1377,40 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,245 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 86,975 \text{ kNm}$$

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

... konzervativně $k_{yy} = 1,00$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \frac{91,50}{1,0 \cdot 1377,40} + 1,0 \frac{15,20}{1,00 \cdot 86,975} =$$
$$= 0,076 + 0,201 = 0,277 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \frac{91,50}{0,952 \cdot 1377,40} + 1,0 \frac{15,20}{1,0 \cdot 86,975} =$$
$$= 0,080 + 0,201 = 0,281 \leq 1,0$$

Podporový nosník pod motorem HEA 160 vyhovuje na kombinaci namáhání tlakovou normálovou silou a ohybovým momentem.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tahové síly pro kombinaci NC247

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{90,45}{\frac{1377,40}{1,15}} + \frac{14,82}{\frac{86,975}{1,15}} =$$

$$= 0,076 + 0,196 = 0,272 \leq 1,0$$

Podporový nosník pod motorem HEA 160 vyhovuje na kombinaci namáhání tahovou normálovou silou a ohybovým momentem.

Posudek na smyk

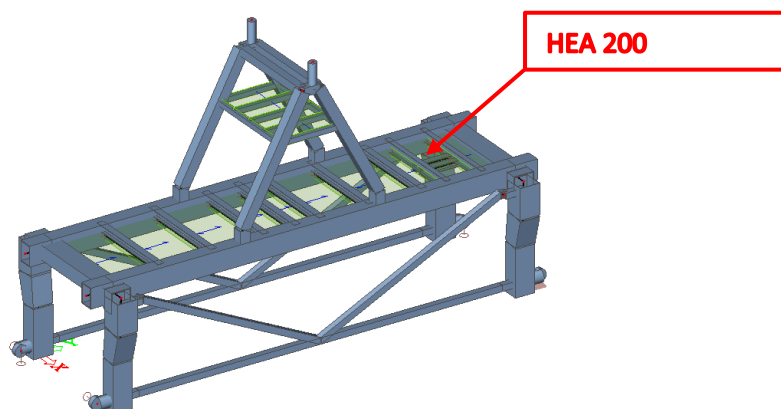
$$A_{vz} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,32 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 235,26 \text{ kN}$$

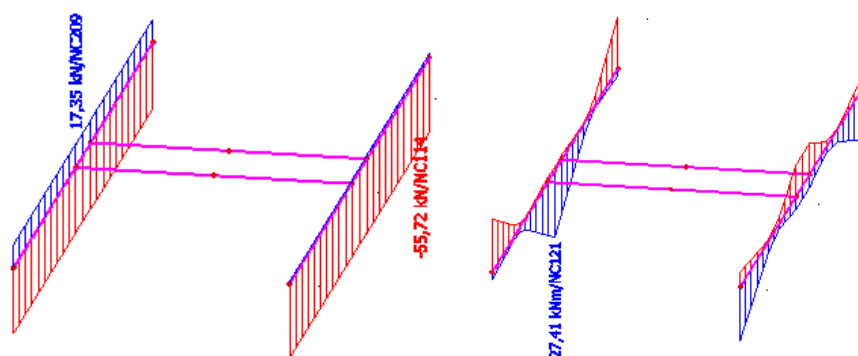
$$V_{Rd} = 235,26 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 33,77 \text{ kN}$$

Nosník jistě vyhovuje na namáhání smykem.

4.4.3 Návrh a posudek příčných nosníků v místě umístění motoru



Obr. 64: Posuzovaný prvek – HEA 200



Obr. 65: Průběh vnitřních sil na nosníku HEA 200 (vlevo N, vpravo My)

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou sílu: NC233

$$N_{Ed,max} = -55,48 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 27,00 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = -42,76 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC124

$$V_{z,Ed,max} = 42,11 \text{ kN}$$

Velikost krouticího momentu je nulová.

Zatřídění průřezu HEA200

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{134}{6,5} = 20,62 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{134}{6,5} = 20,62 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{\frac{200}{2} - 18 - 3,25}{10} = 7,87 \leq 10 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 8,14$$

Splněno – průřez třídy 2

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 5,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

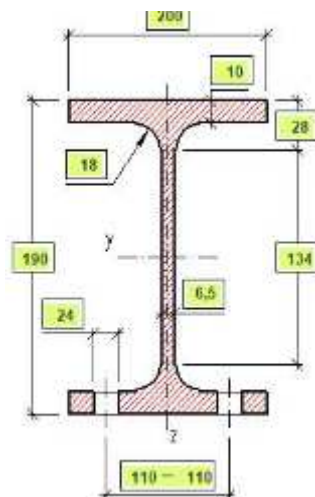
$$i_y = 82,8 \text{ mm}$$

$$i_z = 49,8 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 0,430 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} = 0,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 36,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



$$I_z = 13,4 \cdot 10^{-6} m^4$$

$$I_t = 210 \cdot 10^{-9} m^4$$

$$I_w = 108 \cdot 10^9 mm^6$$

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tlakové síly pro kombinaci NC233

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = L_{LT} = 2400 mm$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2400}{82,8} = 28,99$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{28,99}{76,40} = 0,379 \quad \dots \textit{křivka vzpěrnosti b} \quad \alpha = 0,34$$

$$* \textit{Válcovaný průřez} \quad \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 9,5 \leq 100 mm.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,379 - 0,2) + 0,379^2] = 0,653$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,653 + \sqrt{0,653^2 - 0,379^2}} = 0,844$$

$$\chi_y = 0,844 \leq 1,00 \quad \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2400}{49,8} = 48,19$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{48,19}{76,40} = 0,630 \quad \dots \textit{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

$$* \textit{Válcovaný průřez} \quad \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 9,5 \leq 100 mm.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,630 - 0,2) + 0,630^2] = 0,804$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,804 + \sqrt{0,804^2 - 0,630^2}} = 0,767$$

$\chi_z = 0,767 \leq 1,00$... dochází ke vzpěru prvku

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 0,50$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{0,50 \cdot 2,4} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 108 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 210 \cdot 10^{-9}}} = 3,023$$

$$C_1 = 1,49$$

$$C_2 = 0,83$$

$$C_3 = 0,00$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot 0,10}{0,50 \cdot 2,4} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 13,4 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 10^9 \cdot 210 \cdot 10^{-9}}} = 3,367$$

$$\zeta_j = 0,00$$

$$\begin{aligned} \mu_{cr} &= \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j)^2} - (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j) \right] = \\ &= \frac{1,49}{0,5} \left[\sqrt{1 + 3,023^2 + (0,83 \cdot 3,367 - 0)^2} - (0,83 \cdot 3,367 - 0) \right] = 12,62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 12,62 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 1340 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 210 \cdot 10^3}}{2400} = \\ &= 36,14 \cdot 10^8 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{430 \cdot 10^3 \cdot 355}{36,14 \cdot 10^8}} = 0,206 \text{ ... křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 2,0.$$

$$\begin{aligned} \phi &= 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,206 - 0,2) + 0,206^2] \\ &= 0,522 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,522 + \sqrt{0,522^2 - 0,206^2}} = 0,998$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 5,38 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1909,90 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,430 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 152,650 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,204 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 72,42 \text{ kNm}$$

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

... konzervativně $k_{yy} = k_{zy} = 1,00$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{55,48}{0,844 \cdot 1909,90}}{1,15} + 1,0 \frac{\frac{27,00}{0,998 \cdot 152,65}}{1,15} + 1,0 \frac{42,76}{72,42} = \\ & = 0,040 + 0,206 + 0,679 = 0,925 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{55,48}{0,767 \cdot 1909,90}}{1,15} + 1,0 \frac{\frac{27,00}{0,998 \cdot 152,65}}{1,15} + 1,0 \frac{42,76}{72,42} = \\ & = 0,044 + 0,206 + 0,679 = 0,929 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{55,48}{1909,90} + \frac{27,00}{152,65} + \frac{42,76}{72,42} = 0,033 + 0,203 + 0,679 = 0,915 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Podporový nosník pod motorem HEA 200 vyhovuje na kombinaci namáhání tlakovou normálovou silou a ohybovým momentem.

Posudek na smyk

$$A_{vz} = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,81 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 322,588 \text{ kN}$$

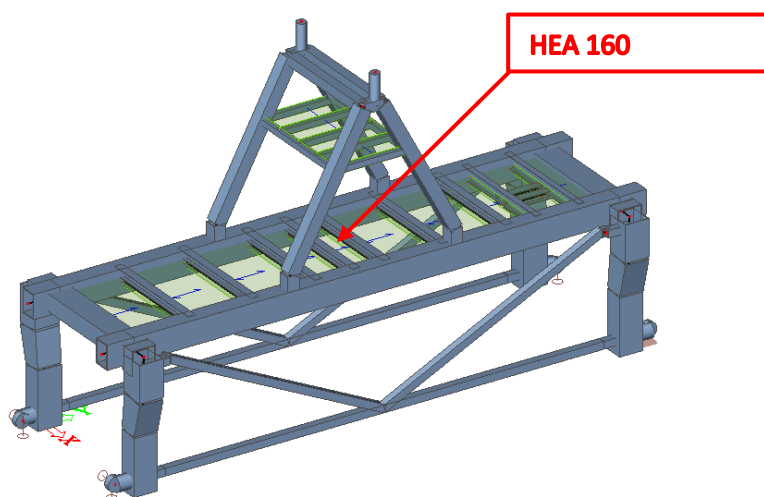
$$V_{Rd} = 322,588 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 42,11 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 322,588 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 2 \cdot 42,11 = 84,22 \text{ kN}$$

Nosník jistě vyhovuje na namáhání smykem.

4.4.4 Posudek příčného nosníku pod kladkostrojem

Ve střední části vozíku je umístěna technologie, která působí na příčně rámově uložený nosník profile HEA160. Nosník je posouzen na tahové namáhání, kombinaci ohybového a osového namáhání a na smykovou únosnost.



Obr. 66: Posuzovaný prvek – HEA160

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou sílu: NC35

$$N_{Ed,max} = 2,87 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 5,41 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 0,22 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC54

$$V_{z,Ed,max} = 9,55 \text{ kN}$$

Velikost krouticího momentu je nulová.

Zatřídění průřezu HEA160

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{104}{6} = 17,33 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{104}{6} = 17,33 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$\frac{\frac{160}{2} - 15 - 3}{9} = 6,88 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 3,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 65,7 \text{ mm}$$

$$i_z = 39,8 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 0,245 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

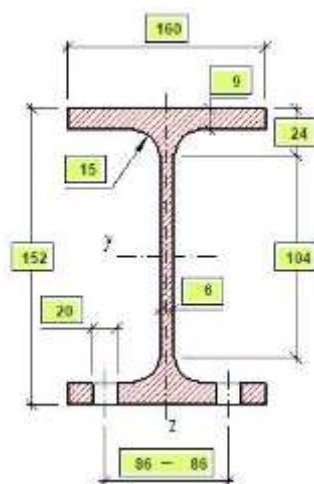
$$W_{pl,z} = 0,118 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 6,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_t = 122 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$I_w = 31,4 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$



Posudek kombinace ohybového momentu a normálové tahové síly pro kombinaci NC35

$$L_{LT} = 2400 \text{ mm}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 0,50$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{0,50 \cdot 2,4} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 31,4 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 122 \cdot 10^{-9}}} = 2,139$$

$$C_1 = 1,00$$

$$C_2 = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,00}{0,50} \left[\sqrt{1 + 2,139^2} \right] = 4,722$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 4,722 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 616 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 122 \cdot 10^3}}{2400} =$$

$$= 6,99 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{245 \cdot 10^3 \cdot 355}{6,99 \cdot 10^8}} = 0,353$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{160}{152} = 1,05 \leq 2,0.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,353 - 0,2) + 0,353^2] \\ = 0,578$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,578 + \sqrt{0,578^2 - 0,353^2}} = 0,966$$

Na klopení prvek jistě vyhoví.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 3,88 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1377,40 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,245 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 86,975 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,118 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 41,890 \text{ kNm}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{2,87}{1377,40} + \frac{5,41}{86,975} + \frac{0,22}{41,890} =$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{2,87}{1,15} + \frac{5,41}{1,15} + \frac{0,22}{1,15} =$$

$$= 0,003 + 0,072 + 0,007 = 0,082 \leq 1,0$$

Podporový nosník pod kladkostrojem HEA 160 vyhovuje na kombinaci namáhání tahovou normálovou silou a ohybovým momentem.

Posudek na smyk

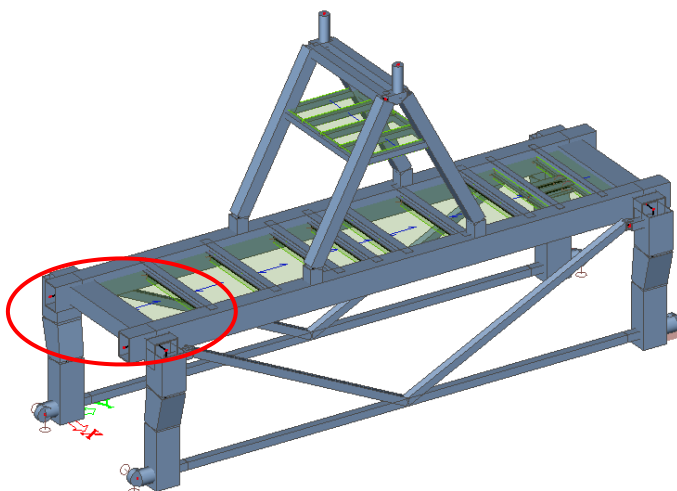
$$A_{vz} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1,32 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 235,26 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = 235,26 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 9,55 \text{ kN}$$

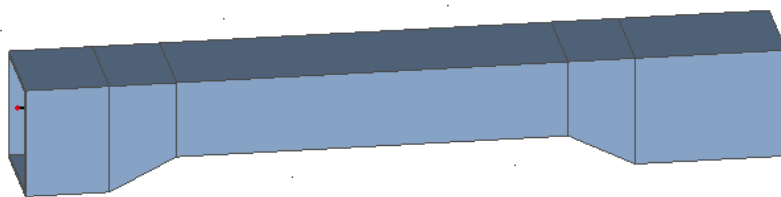
Nosník jistě vyhovuje na namáhání smykem.

4.4.5 Posudek uzavřeného hlavního příčného nosníku

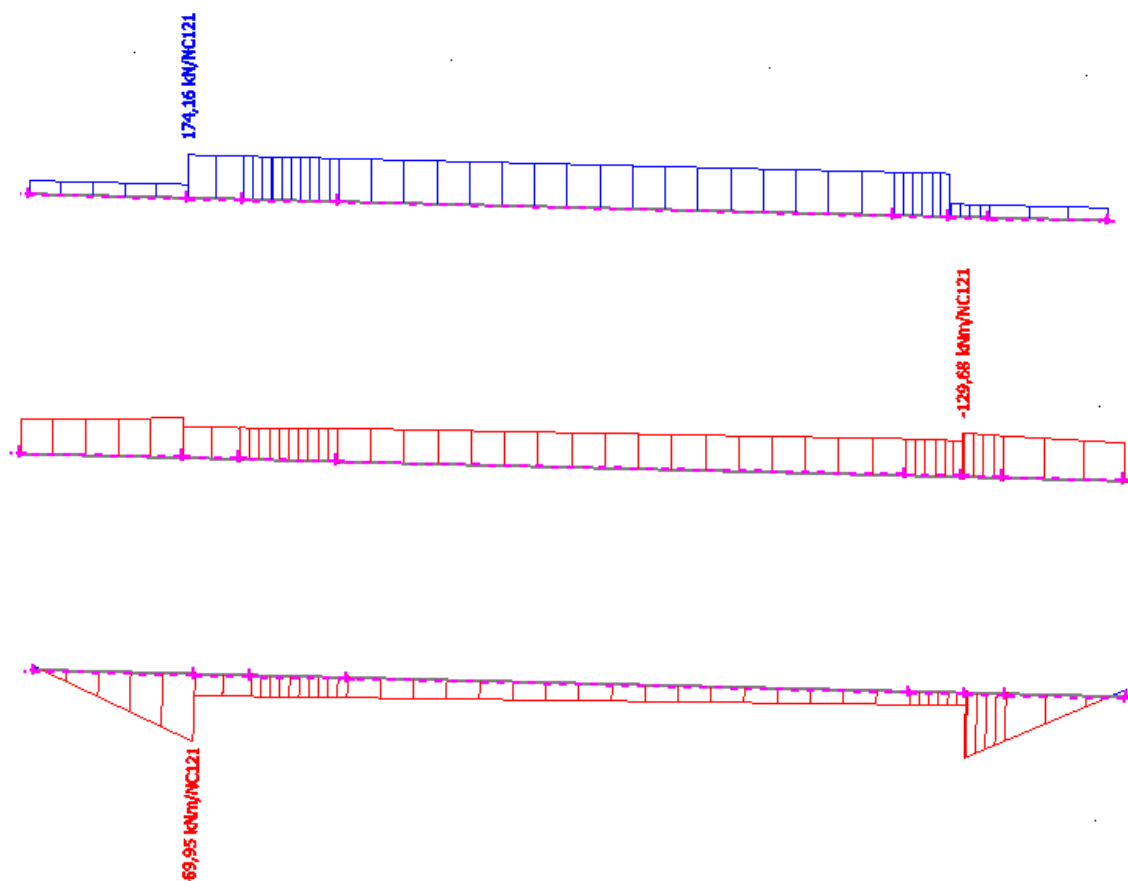


Obr. 67: Posuzovaný příčný nosník s náběhem

Hlavní příčný nosník je tvořený uzavřeným průřezem s tloušťkou stěn 16 mm, průřez je svařený atypických rozměrů 500 x 350 mm. V místech napojení na sloup vozíku je vytvořený náběh na velikost průřezu 500 x 500 mm pro plynulejší přechod vnitřních sil do sloupu konstrukce.



Obr. 68: Nosník s náběhy – příčný hlavní prvek vozíku



Obr. 69: Vnitřní síly na příčném nosníku (od shora N , M_y , M_z)

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou tlakovou sílu: NC132

$$N_{Ed,max} = -64,76 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 126,18 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 70,00 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou tahovou sílu: NC121

$$N_{Ed,max} = 174,16 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 130,78 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 70,00 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu NC63:

$$V_{z,Ed,max} = 37,18 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,př} = 82,81 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu 500x350x16

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 16}{16} = 29,25 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 16}{16} = 29,25 \leq 38 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 30,91$$

Splněno – průřez třídy 2

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 2,617 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$i_y = 143 \text{ mm}$$

$$i_z = 188 \text{ mm}$$

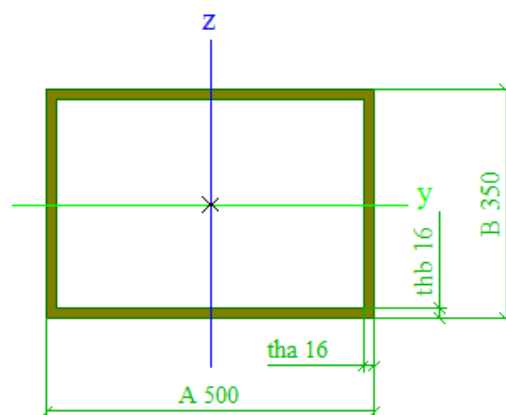
$$W_{y,pl} = 3,481 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 4,463 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 5,323 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_z = 9,295 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

*Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.



Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC132

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 2400 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2400}{143} = 16,78$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{16,78}{76,40} = 0,220 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* Průřez dutý tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,220 - 0,2) + 0,220^2] = 0,529$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,529 + \sqrt{0,529^2 - 0,220^2}} = 0,990$$

$$\chi_y = 0,984 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2400}{188} = 12,77$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{12,77}{76,40} = 0,167 \leq 0,2 \quad \dots \text{ lze zanedbat vliv vzpěru ve směru y - y}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,617 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3 = 9290,35 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 3,481 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1235,75 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 4,463 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1584,365 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{64,67}{0,990 \cdot 9290,35}}{1,15} + 1,01 \frac{\frac{126,18}{1,00 \cdot 1235,75}}{1,15} + 0,600 \frac{\frac{70,00}{1584,365}}{1,15} = \\ & = 0,008 + 0,117 + 0,030 = 0,156 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{64,67}{1,00 \cdot 9290,35}}{1,15} + 0,600 \frac{\frac{126,18}{1,00 \cdot 1235,75}}{1,15} + 1,01 \frac{\frac{70,00}{1584,365}}{1,15} = \\ & = 0,008 + 0,070 + 0,051 = 0,126 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{64,67}{9290,35}}{1,15} + \frac{\frac{126,18}{1235,75}}{1,15} + \frac{\frac{70,00}{1584,365}}{1,15} = \\ & = 0,008 + 0,117 + 0,051 = 0,173 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Průřez 500x350x16 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{174,16}{9290,35}}{1,15} + \frac{\frac{130,78}{1235,75}}{1,15} + \frac{\frac{70,00}{1584,365}}{1,15} = \\ & = 0,022 + 0,122 + 0,051 = 0,195 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Průřez 500x350x16 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly a krouticího momentu pro kombinaci NC63

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,617 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35}{(0,35 + 0,5)} = 1,078 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,078 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} \cdot 10^{-3} = 1921,27 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 1921,27 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 37,18 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 1921,27 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 37,18 = 74,36 \text{ kN}$$

Průřez 500x350x16 vyhovuje na prostý smyk.

Prosté kroucení

$$A_s = (500 - 16) \cdot (350 - 16) \cdot 10^{-6} = 16,17 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$W_t = 2 \cdot t \cdot A_s = 2 \cdot 0,016 \cdot 16,17 \cdot 10^{-2} = 5,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\tau_{Ed} = \frac{T_{Ed}}{W_t} = \frac{82,81 \cdot 10^3}{5,17 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-6} = 16,02 \text{ MPa}$$

$$T_{Rd} = \frac{W_t \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{5,17 \cdot 10^{-3} \cdot 355}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 = 921,43 \text{ kNm}$$

$$T_{Rd} = 921,43 \text{ kNm} \geq T_{Ed} = 16,02 \text{ kNm}$$

Průřez 500x350x16 vyhovuje na prosté volné kroucení.

Kombinace smykové síly a krouticího momentu

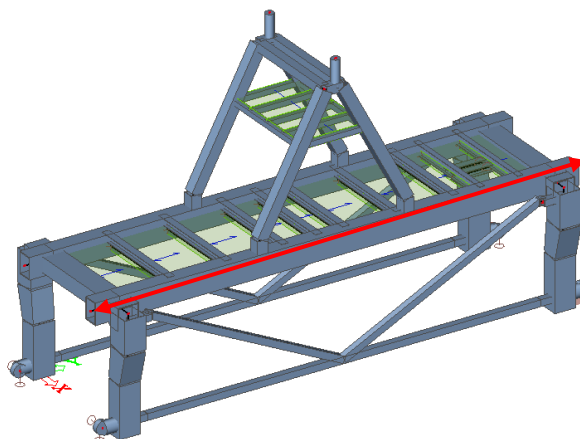
$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \right)} \right] \cdot V_{pl,Rd} = \left[1 - \frac{16020 \cdot 10^3}{\left(\frac{355 \cdot 10^6}{\sqrt{3}} \right)} \cdot \frac{1}{1,15} \right] \cdot 1921,27 = 1748,57 \text{ kN}$$

$$V_{pl,T,Rd} = 1748,15 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 37,18 \text{ kN}$$

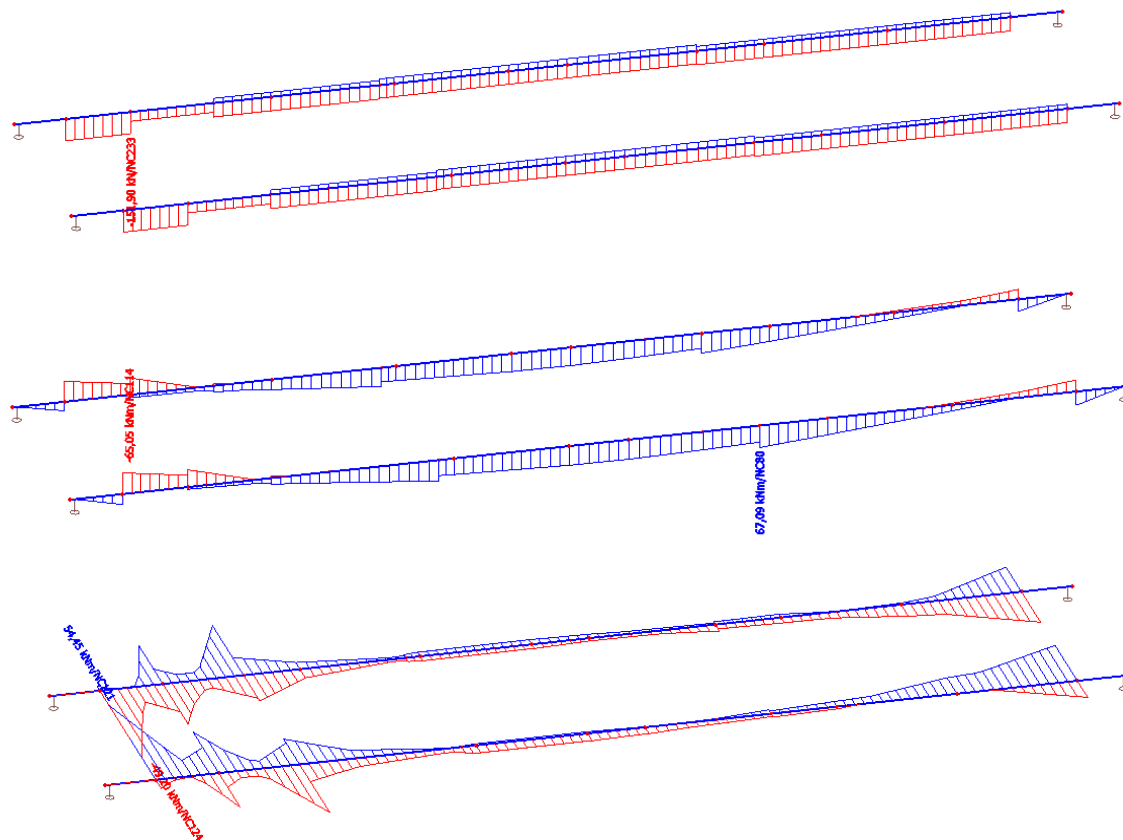
Průřez 500x350x16 vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

4.4.6 Návrh a posudek podélného nosníku vozíku

Předpokladem je, že podélný hlavní nosník se bude ke konstrukci sloupů spolu s příčným nosníkem připojovat pomocí montážního přípoje v těsné vzdálenosti za sloupem vozíku. Podélný nosník je namáhán velkou tlakovou silou a ohybovým momentem, který je způsobený lokálním zatížením od příčným nosníků IPE120.



Obr. 70: Posuzovaný podélný nosník vozíku



Obr. 71: Vnitřní síly na vodorovné nosníku (od shora N , M_y , M_z)

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou sílu: NC233

$$N_{Ed,max} = -161,96 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = 45,66 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -69,12 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 58,00 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC111

$$V_{z,Ed,max} = 75,80 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,př} = 33,30 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu 350x500x16 (20)

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 20}{20} = 23,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 20}{20} = 23,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 2,872 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$i_y = 193 \text{ mm}$$

$$i_z = 139 \text{ mm}$$

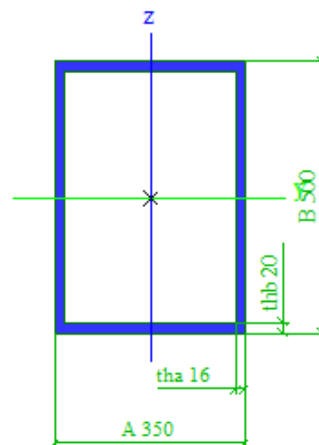
$$W_{y,pl} = 5,053 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 3,683 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 1,066 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_z = 5,538 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*



Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC233

$$L_{cr,y} = 703 \text{ mm}$$

$$L_{cr,z} = 10270 \text{ mm}$$

Vzpěrná délka je vymezena podepřením nosníku v místě napojení na sloup a ve směru osy y je prvek podepřen napojením příčných nosníku podporujících pochozí rošt.

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{703}{193} = 3,64$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{3,64}{76,40} = 0,05 \leq 0,2 \dots \text{lze zanedbat klopení ve směru osy } z - z$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{10270}{139} = 73,88$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{73,88}{76,40} = 0,967 \dots \text{křivka vzpěrnosti } c \quad \alpha = 0,49$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,967 - 0,2) + 0,967^2] = 1,155$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,155 + \sqrt{1,155^2 - 0,967^2}} = 0,560$$

$$\chi_z = 0,560 \leq 1,00 \dots \text{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,872 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3 = 10195,6 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 5,053 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1793,82 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 3,683 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1307,47 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\alpha_s = -1,04$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8\alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-1) = \mathbf{0,90} \geq 0,40$$

$$k_{yy} = 0,900$$

$$k_{zz} = 1,030$$

$$k_{zy} = 0,540$$

$$k_{yz} = 0,615$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{161,96}{\frac{1,00 \cdot 10195,6}{1,15}} + 0,900 \frac{69,12}{\frac{1,00 \cdot 1793,82}{1,15}} + 0,615 \frac{58,00}{\frac{1307,47}{1,15}} = \\ & = 0,018 + 0,040 + 0,031 = 0,089 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_{yz} \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{161,96}{\frac{0,560 \cdot 10195,6}{1,15}} + 0,540 \frac{69,12}{\frac{1,00 \cdot 1793,82}{1,15}} + 1,03 \frac{58,00}{\frac{1307,47}{1,15}} = \\ & = 0,033 + 0,025 + 0,053 = 0,111 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{161,96}{\frac{10195,6}{1,15}} + \frac{69,12}{\frac{1793,82}{1,15}} + \frac{58,00}{\frac{1307,47}{1,15}} = 0,018 + 0,044 + 0,052 = 0,114 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Průřez 500x350x16 (20) vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{45,66}{\frac{10195,6}{1,15}} + \frac{69,12}{\frac{1793,82}{1,15}} + \frac{58,00}{\frac{1307,47}{1,15}} = 0,002 + 0,044 + 0,052 = 0,098 \leq 1,00$$

Průřez 500x350x16 (20) vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly a krouticího momentu pro kombinaci NC111

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,782 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5}{(0,35 + 0,5)} = 1,636 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,636 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 2915,77 \text{ kN}$$

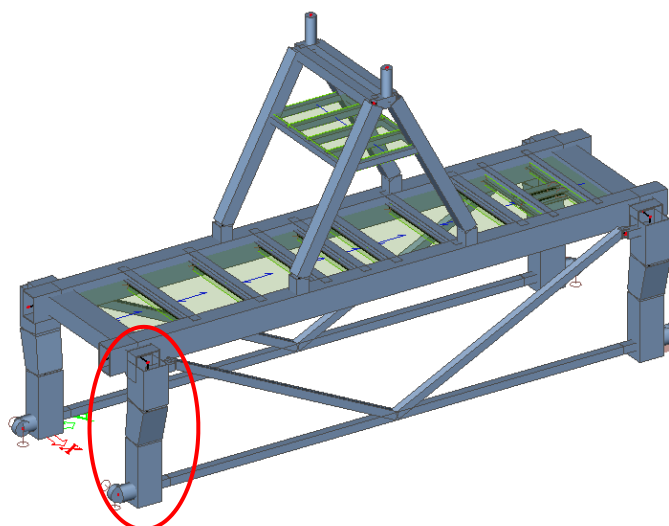
$$V_{pl,Rd} = 2915,77 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 75,80 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 2915,77 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 75,80 = 151,60 \text{ kN}$$

Průřez 500x350x16 (20) vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 500x350x16 (20) jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

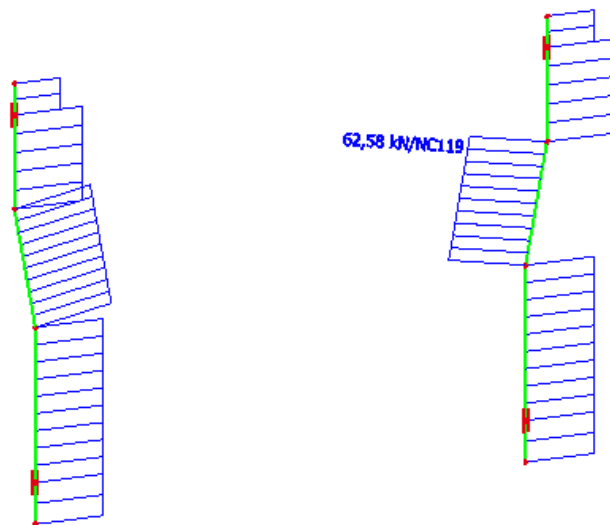
4.4.7 Návrh a posudek sloupu konstrukce vozíku



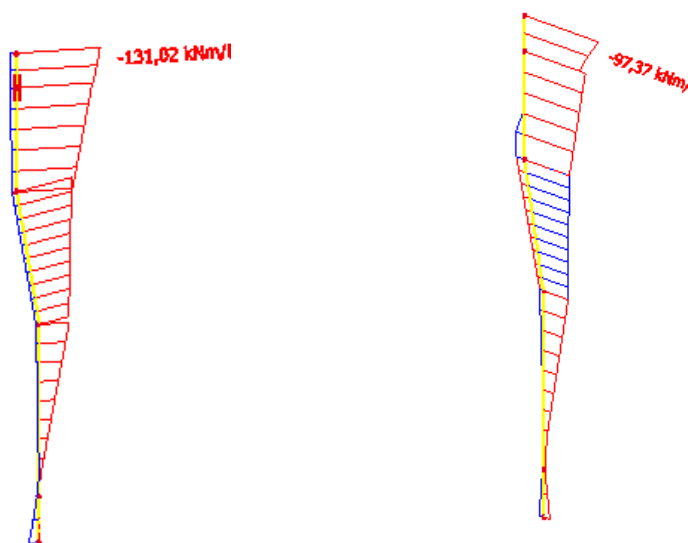
Obr. 72: Posuzovaný sloup konstrukce vozíku

Sloup je tvořený uzavřeným průřezem s tloušťkou stěn 16 mm, průřez je svařený atypických rozměrů 500 x 390 mm. V místech napojení na sloup vozíku

je vytvořený náběh na velikost průřezu 500 x 500 mm pro plynulejší přechod vnitřních sil do sloupu konstrukce.



Obr. 73: Návrhové vnitřní síly sloupu vozíku – normálová síla N



Obr. 74: Návrhové vnitřní síly sloupu vozíku – ohybový moment M_y, M_z

Vnitřní síly v místě horní části sloupu:

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou tlakovou sílu: NC119

$$N_{Ed,max} = 62,58 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -131,02 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 98,00 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou tahovou sílu: NC121

$$N_{Ed,max} = -17,19 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -131,02 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 98,00 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC113

$$V_{z,Ed,max} = 54,54 \text{ kN}$$

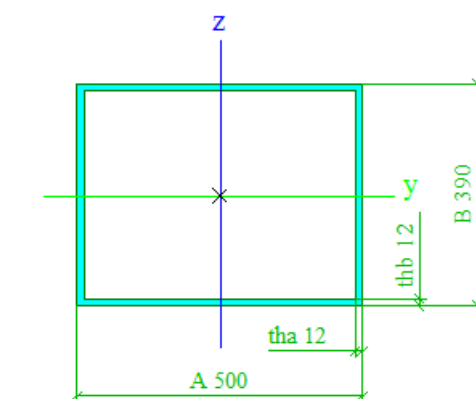
$$T_{Ed,př} = -11,90 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu 500x390x12

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 12}{12} = 39,66 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$



Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 12}{12} = 39,66 \geq 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Není splněno – průřez třídy 4

Stanovení účinné plochy průřezu

Vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 500 - 12 \cdot 3 = 464 \text{ mm}$$

Pro tlačený průřez konzervativně $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{464}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 0,836$$

$$\bar{\lambda}_p \geq 0,637; 3 + \psi = 3 + 1 = 4 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,836 - 0,055(3 + 1)}{0,836^2} = 0,881$$

Svislá pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 390 - 12 \cdot 3 = 354 \text{ mm}$$

Pro tlačný průřez konzervativně $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{354}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 0,638$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,638 \leq 0,637$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = 1,00$$

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 2,078 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$A_{eff} = 2,078 \cdot 10^{-2} \cdot 0,881 = 1,830 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

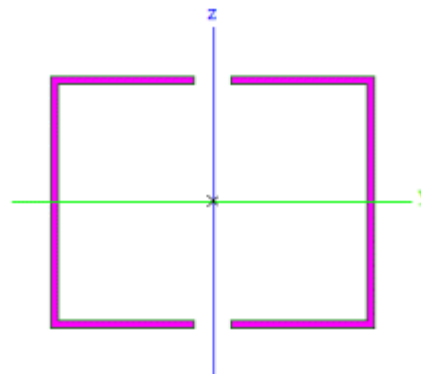
$$i_y = 157 \text{ mm}$$

$$i_z = 199 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff} = 2,452 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff} = 3,098 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

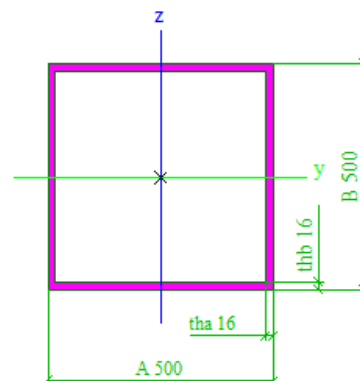
**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*



Zatřídění průřezu 500x500x12

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$



$$\frac{500-2 \cdot 12}{12} = 39,66 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{500-2 \cdot 12}{12} = 39,66 \geq 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Není splněno – průřez třídy 4

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

Konzervativně je proveden posudek pro malý profil ve spodní části sloupu se vzpěrnou délkou v rovině a z roviny rovnou výšce sloupu konstrukce vozíku. Proměnný průřez jasně ovlivní a sníží hodnotu vzpěrné délky, pokud vyhovuje pro dané namáhání menší z průřezů sloupu s náběhem, sloup jistě vyhoví.

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC119

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = 2709 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2709}{157} = 17,25$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{17,25}{76,40} \sqrt{\frac{0,0183}{0,02078}} = 0,212 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

** Průřez dutý tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,212 - 0,2) + 0,212^2] = 0,525$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,525 + \sqrt{0,525^2 - 0,212^2}} = 0,994$$

$$\chi_y = 0,994 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2709}{199} = 13,61$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{13,61}{76,40} \sqrt{\frac{0,0183}{0,02078}} = 0,167$$

$\leq 0,2$... lze zanedbat vliv vzpěru ve směru y – y

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,746 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3 = 9748,30 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = A_{eff} \cdot f_y = 1,830 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3 = 6496,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{eff,y} \cdot f_y = 2,452 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 870,46 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{eff,z} \cdot f_y = 3,098 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1099,79 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{eff,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{eff,y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{eff,z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{17,19}{0,994 \cdot 6496,5}}{1,15} + 1,0 \frac{\frac{131,02}{1,00 \cdot 870,46}}{1,15} + 0,600 \frac{\frac{98,00}{1099,79}}{1,15} = \\ & = 0,004 + 0,173 + 0,062 = 0,239 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{eff,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{eff,y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{eff,z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{\frac{17,19}{1,00 \cdot 6496,5}}{1,15} + 0,6 \frac{\frac{131,02}{1,00 \cdot 870,46}}{1,15} + 1,0 \frac{\frac{98,00}{1099,79}}{1,15} = \\ & = 0,004 + 0,104 + 0,102 = 0,210 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$\frac{17,19}{\frac{6496,5}{1,15}} + \frac{131,02}{\frac{870,46}{1,15}} + \frac{98,00}{\frac{1099,79}{1,15}} =$$

$$= 0,004 + 0,173 + 0,102 = 0,279 \leq 1,00$$

Průřez 500x390x12 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{62,58}{\frac{9748,30}{1,15}} + \frac{131,02}{\frac{870,46}{1,15}} + \frac{98,00}{\frac{1099,79}{1,15}} =$$

$$= 0,007 + 0,173 + 0,102 = 0,282 \leq 1,00$$

Průřez 500x390x12 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly a krouticího momentu pro kombinaci NC113

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,746 \cdot 10^{-2} \cdot 0,39}{(0,39 + 0,5)} = 1,20 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,20 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 2138,71 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 2138,71 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 54,54 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 2138,71 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 54,54 = 109,08 \text{ kN}$$

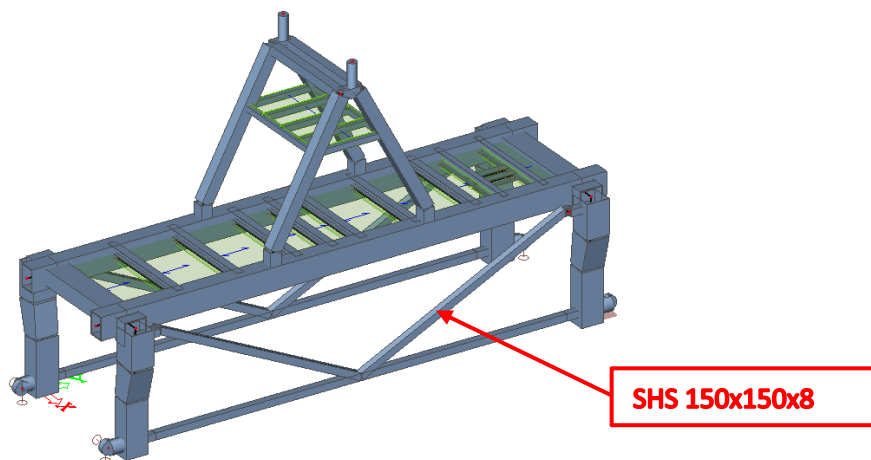
Průřez 500x390x12 vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 500x390x12 jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

4.4.8 Posudek výztuhy vozíku

Výztuha je tvořena uzavřeným profilem SHS 150x150x8, který je připojený ke sloupu se značnou excentricitou v hodnotě 135 mm vzhledem k ose sloupu vozíku směrem bližším k vnitřní hraně sloupu. Excentricita je modelována v software Scia Engineer pomocí krátkého prutu stejného profilu jako výztuha,

který spojuje výztuhu skloněnou a prvek výztuhy navařený přímo na sloupu vozíku.



Obr. 75: Posuzovaný prvek – výztuha 150x150x8

Rozhodující kombinace pro maximální tlakovou normálovou tlakovou sílu: NC122

$$N_{Ed,max} = -42,85 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 8,85 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 1,14 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou tahovou sílu: NC99

$$N_{Ed,max} = 91,87 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 8,85 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 1,14 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC82

$$V_{z,Ed,max} = 0,59 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,př} = 0,28 \text{ kNm} \dots \text{hodnotu krouticího momentu lze zanedbat}$$

Průřezové charakteristiky výztuhy

$$A = 4,408 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 58 \text{ mm}$$

$$i_z = 58 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = W_{z,pl} = 2,342 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = I_z = 1,491 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

Vzpěr ve směru osy z-z a y-y

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{5154}{58} = 88,86$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{88,86}{76,40} = 1,163 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

** Průřez dutý tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (1,163 - 0,2) + 1,163^2] = 1,412$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,412 + \sqrt{1,412 - 1,163^2}} = 0,452$$

$$\chi_y = 0,452 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 4,408 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1564,84 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 2,342 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 83,141 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 2,342 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 83,141 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{42,85}{\frac{0,452 \cdot 1564,84}{1,15}} + 1,06 \frac{8,85}{\frac{1,00 \cdot 83,141}{1,15}} + 0,633 \frac{1,14}{\frac{83,141}{1,15}} =$$

$$= 0,070 + 0,131 + 0,010 = 0,210 \leq 1,00$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{42,85}{\frac{0,452 \cdot 1564,84}{1,15}} + 0,633 \frac{8,85}{\frac{1,00 \cdot 83,141}{1,15}} + 1,06 \frac{1,14}{\frac{83,141}{1,15}} =$$

$$= 0,070 + 0,078 + 0,017 = 0,164 \leq 1,00$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{42,85}{\frac{1564,84}{1,15}} + \frac{8,85}{\frac{83,141}{1,15}} + \frac{1,14}{\frac{83,141}{1,15}} = 0,031 + 0,122 + 0,016 = 0,170 \leq 1,00$$

Průřez 150x150x8 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{91,87}{\frac{1564,84}{1,15}} + \frac{8,85}{\frac{83,141}{1,15}} + \frac{1,14}{\frac{83,141}{1,15}} = 0,068 + 0,122 + 0,016 = 0,206 \leq 1,00$$

Průřez 150x150x8 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC82

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{4,408 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15}{(0,15 + 0,15)} = 2,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{2,204 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 392,81 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 392,81 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 0,59 \text{ kN}$$

Průřez 150x150x8 vyhovuje na prostý smyk.

4.4.9 Posudek spodní výztuhy vozíku

Výztuha je tvořena uzavřeným profilem SHS 150x150x8, který je připojený ke spodní části sloupu se stejnou excentricitou v hodnotě 135 mm. Excentricita je modelována v software Scia Engineer pomocí krátkého prutu se zvýšenou tuhostí.

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou sílu: NC122

$$N_{Ed,max} = 88,36 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 0,60 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -2,10 \text{ kNm}$$

Rozhodující kombinace pro maximální smykovou sílu: NC107

$$V_{z,Ed,max} = 0,36 \text{ kN}$$

$$T_{Ed,př} = 0,80 \text{ kNm} \dots \text{hodnotu krouticího momentu lze zanedbat}$$

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{88,36}{\frac{1564,84}{1,15}} + \frac{2,10}{\frac{83,141}{1,15}} =$$

$$= 0,065 + 0,030 = 0,095 \leq 1,00$$

Průřez 150x150x8 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

4.5 Posudek styčníků konstrukce vozíku

Vozík je navržen z několika částí, které jsou svařeny rovnou v dílně a pak převezeny na místo trvalého umístění konstrukce na hlavní mostový nosník shrnovače. Jednotlivé části jsou převážně spojeny pomocí montážního šroubového přípoje s čelními deskami. Příčné nosníky vytvářející podporu

pochozímu roštu na vozíku a v místě umístění pohonného zařízení jsou navařeny na uzavřený průřez podélného nosníku vozíku pomocí koutového svaru. V této kapitole je proveden posudek jednotlivých vybraných styčníků.

4.5.1 Posudek svařovaného styčnicku nosníku tvořícího podporu pochozímu roštu

- Svarový přípoj nosníku **IPE120**

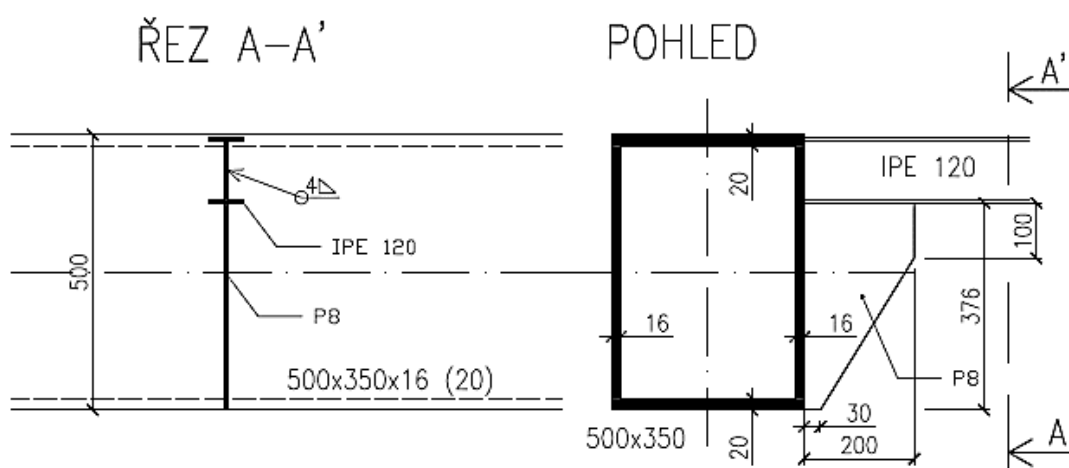
Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 14,96 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,max} = 3,35 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 1,75 \text{ kNm}$$

Hodnota ohybového momentu $M_{z,Ed}$ je zanedbatelných hodnot.



Obr. 76: Svarový přípoj nosníků IPE120 podporujících pochozí rošt

Posudek na působení smykové síly

Je uvažovaný svar pouze kolem profilu IPE120.

Napjatost ve svarech na stojině:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot a_w(h - 2t_f)} = \frac{3350}{2 \cdot 4(120 - 2 \cdot 6,3)} = 3,90 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 3,90 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,30} = 251,67 \text{ MPa}$$

$$I_w = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 64 \cdot 4^3 + 64 \cdot 4 \cdot 62^2 \right) + 4 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 29,8 \cdot 4^3 + 29,8 \cdot 4 \cdot 21,7^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4 \cdot 99,4^3 \right) = 28,48 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_1}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{1075 \cdot 0,0537}{\sqrt{2} \cdot 2,848 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 14,33 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{14,33^2 + 3 \cdot (14,33^2 + 3,90^2)} = 29,45 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

Navržený svar na stojně vyhovuje.

Napjatost ve svarech na pásnici:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_2}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{1075 \cdot 0,064}{\sqrt{2} \cdot 2,848 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 17,08 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{17,08^2 + 3 \cdot (17,08^2 + 3,90^2)} = 34,82 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

Navržený svar na pásnici vyhovuje.

- Svarový přípoj nosníku **HEA160**

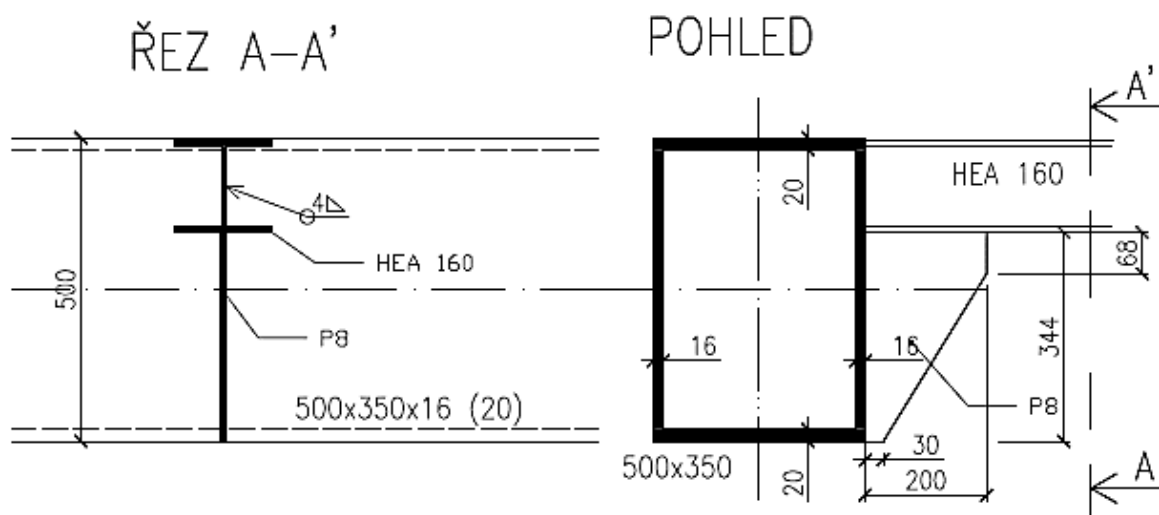
Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = -2,87 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,max} = 9,63 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 5,41 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 0,22 \text{ kNm}$$



Obr. 77: Svarový přípoj nosníků HEA160

Je uvažovaný svar pouze kolem profilu HEA160.

Napjatost ve svarech na stojně:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot a_w(h - 2t_f)} = \frac{9630}{2 \cdot 4(152 - 2 \cdot 9)} = 8,98 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 8,98 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,30} = 251,67 \text{ MPa}$$

$$I_{w1} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 160 \cdot 4^3 + 160 \cdot 4 \cdot 78^2 \right) + 4 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 157 \cdot 4^3 + 157 \cdot 4 \cdot 65^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4 \cdot 126^3 \right) = 19,73 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_1}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{5410 \cdot 0,067}{\sqrt{2} \cdot 19,73 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 12,99 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{12,99^2 + 3 \cdot (12,99^2 + 8,98^2)} = 30,28 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

Navržený svar na stojně vyhovuje s dostatečnou rezervou i pro přenos ohybového momentu M_z .

Napjatost ve svarech na pásnici:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_2}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{5410 \cdot 0,080}{\sqrt{2} \cdot 19,73 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 15,51 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{15,51^2 + 3 \cdot (15,51^2 + 8,98^2)} = 34,70 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

Navržený svar na pásnici vyhovuje s dostatečnou rezervou i pro přenos ohybového momentu M_z .

- Svarový přípoj nosníku **HEA200**

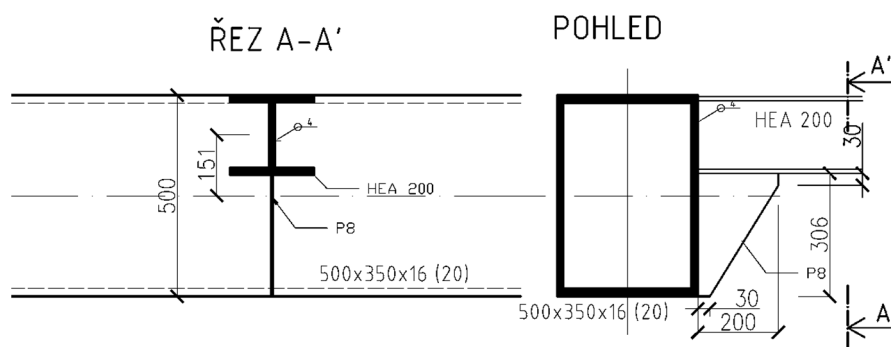
Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = -55,48 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,max} = 42,11 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 27,76 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 53,49 \text{ kNm}$$



Obr. 78: Svarový přípoj nosníků HEA200

Napjatost ve svarech na stojině:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot a_w (h - 2t_f)} = \frac{42110}{2 \cdot 4(190 - 2 \cdot 10)} = 30,96 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 30,96 \text{ MPa} \leq f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,30} = 251,67 \text{ MPa}$$

$$I_{w1} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 4^3 + 200 \cdot 4 \cdot 95^2 \right) + 4 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 96,75 \cdot 4^3 + 96,75 \cdot 4 \cdot 82^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4 \cdot 160^3 \right) = 28,48 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_1}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{27760 \cdot 0,085}{\sqrt{2} \cdot 28,48 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 58,58 \text{ MPa}$$

$$I_{w2} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 200^3 \cdot 4 + 200 \cdot 4 \cdot 95^2 \right) + 4 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 96,75^3 \cdot 4 + 96,75 \cdot 4 \cdot 82^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4^3 \cdot 160 \right) = 31,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_1}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{53490 \cdot 0,100}{\sqrt{2} \cdot 31,39 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 120,50 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{(120,50 + 58,58)^2 + 3 \cdot ((120,50 + 58,58)^2 + 30,96^2)} = 362,152 \text{ MPa} \leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

Navržený svar na stojině vyhovuje.

Napjatost ve svarech na pásnici:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_2}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{27760 \cdot 0,099}{\sqrt{2} \cdot 28,48 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 68,23 \text{ MPa}$$

$$I_{w2} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 200^3 \cdot 4 + 200 \cdot 4 \cdot 95^2 \right) + 4 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 96,75^3 \cdot 4 + 96,75 \cdot 4 \cdot 82^2 \right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4^3 \cdot 160 \right) = 31,39 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{M_{Ed} \cdot z_1}{\sqrt{2} \cdot I_w} = \frac{53490 \cdot 0,100}{\sqrt{2} \cdot 31,39 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 120,50 \text{ MPa}$$

Výsledné namáhání:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{(68,23 + 120,50)^2 + 3 \cdot ((68,23 + 120,50)^2 + 30,96^2)} = 381,25 \text{ MPa}$$

$$\leq \frac{510}{0,9 \cdot 1,30} = 435,90 \text{ MPa}$$

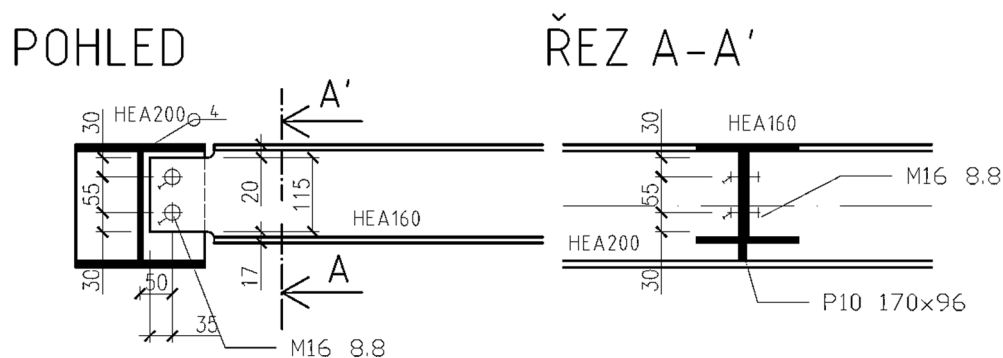
Navržený svar na pásnici vyhovuje.

4.5.2 Posudek šroubového připoje nosníku HEA200 a HEA160

Jedná se o kloubové připojení nosníku pod motorem profilu HEA160 a nosníku HEA200. Šroubový přípoj v rovině xz je schopen přenášet ohybové momenty. Šroubovaný přípoj je navržený s výztuhou tloušťky 12 mm profilu HEA200 a se šrouby M16 třídy pevnosti 8.8, které je z důvodu dynamického zatížení konstrukce vhodné předepnout.

Maximální vnitřní síly:

$$V_{Ed,max} = 33,77 \text{ kN}$$



Obr. 79: Šroubový přípoj nosníku průřezu HEA160 a HEA200

Šroub je jednostřížný se závitem po celé délce dřívku šroubu.

Návrhová únosnost šroubu (jedna střížná plocha) se určí dle vztahu:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 157}{1,30} \cdot 10^{-3} = 57,96 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho šroubu v otlačení (rozhoduje tloušťka stojiny nosníku HEA160):

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{30}{3 \cdot 18} = 0,556 \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 = \frac{55}{3 \cdot 18} - 0,25 = 0,769 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,569 \end{array} \right\} = 0,556$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{0,556 \cdot 2,5 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 6}{1,30} \cdot 10^{-3} = 52,35 \text{ kN}$$

Rozhoduje únosnost v otlačení.

$$M_{Ed} = V_{Ed} \cdot e = 33,77 \cdot 0,05 = 1,69 \text{ kNm}$$

Předpokládá se rovnoměrné rozdělení sil působících na krajní šrouby od momentu:

$$F_{h,Ed} = \frac{M_{Ed}}{p} = \frac{1690}{0,055} = 30,72 \text{ kN}$$

Posouvající síla se rozdělí na šrouby na stěně nosníku HEA160 rovnoměrně:

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{33,77}{2} = 16,89 \text{ kN}$$

Výslednice na jeden šroub:

$$F_{Ed} = \sqrt{F_{v,Ed}^2 + F_{h,Ed}^2} = \sqrt{16,89^2 + 30,72^2} = 35,06 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 52,35 \text{ kN} \geq F_{Ed} = 35,06 \text{ kN}$$

Šroubový přípoj vyhovuje.

Posouzení vytržení skupiny šroubů

$$A_{nt} = t_{w,b} \left(a_5 - \frac{d_0}{2} \right) = 6,0 \left(50 - \frac{18}{2} \right) = 246 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = t_{w,b}(a_1 + a_2 - 1,5d_0) = 6,0 (30 + 55 - 1,5 \cdot 18) = 348 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{ub} \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_{yb} \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 510 \cdot 246}{1,30} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{355 \cdot 348}{1,15} \cdot 10^{-3} = 110,28 \text{ kN}$$

$$V_{eff,Rd} = 110,28 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 33,77 \text{ kN}$$

Stojina nosníku vyhoví na vytržení skupiny šroubů.

Posouzení oslabené profilu na smyk

$$A_v = 6 \cdot 140 = 840 \text{ mm}^2$$

$$V_{ez,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{840 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,15} \cdot 10^{-3} = 149,71 \text{ kN}$$

$$V_{ez,Rd} = 149,71 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 33,77 \text{ kN}$$

Oslabený průřez vyhovuje na smyk.

Posouzení ohybové únosnosti profilu

$$W_{pl} = 6 \cdot 140^2 = 11,76 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{11,76 \cdot 10^4 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-6} = 36,30 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Rd} = 36,30 \text{ kN} \geq M_{Ed,max} = V_{Ed,max} \cdot e_y = 33,77 \cdot 0,06 = 2,03 \text{ kNm}$$

Oslabený průřez vyhovuje na ohyb od smykové síly.

4.5.3 Posudek montážního přípoje pomocí čelních desek příčného nosníku

Montážní přípoj je realizován pomocí čelních desek, na konstrukci sloupu jsou připraveny konzolky s čelními deskami, na které se později přišroubuje podélný nosník, konzola pro umístění nárazníku a příčný nosník vozíku.

Stanovení nejmenší tloušťky, při které nedochází k páčení:

$$t_e = 4,3 \left(\frac{b \cdot d^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{35 \cdot 16^2}{40} \right)^{\frac{1}{3}} = 26,11 \text{ mm} \geq 16 \text{ mm}$$

Musí se posoudit vliv páčení.

$$\gamma_p = 1 + 0,005 \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \frac{26,11^3 - 16^3}{16^2} = 1,27$$

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy y

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 84 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 84 = 119,97 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} L_{eff,4p} &= 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 84 \\ &= 116,64 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 105 + 0,5 \cdot 84 = 94,5 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{155,95; 119,97; 116,64; 94,5\} = 94,50 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94,50 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,87 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 1,87 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 150,68 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94,50 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,87 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{1,87 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 81,79 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{166,80; 81,79; 86,95\} = 81,79 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 94,50 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{94,50 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 466,75 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{81,79; 466,75\} = 81,79 \text{ kN}$$

2. Řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$p = 84 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 84 = 119,97 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 84 = 116,64 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 105 + 0,5 \cdot 84 = 94,5 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{155,95; 119,97; 116,64; 94,5\} = 94,50 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94,50 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,87 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 1,87 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 150,68 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94,50 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,87 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{1,87 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 81,79 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{166,80; 81,79; 86,95\} = 81,79 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 94,50 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{94,50 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 466,75 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{81,79; 466,75\} = 81,79 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$\begin{aligned} M_{j,Rd} &= \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 2 \cdot 81,79 \cdot 10^3 \cdot (49 + 133 + 217 + 301) \cdot 10^{-6} \\ &= 114,51 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{j,Rd} = 114,51 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 110,07 \text{ kNm}$$

Stýčník vyhovuje na ohybovou únosnost ve směru osy y.

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy z

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 115 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 115 = 135,47 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} L_{eff,4p} &= 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 115 \\ &= 132,140 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot p + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 110 + 0,5 \cdot 115 = 112,50 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{155,95; 149,28; 135,47; 132,14; 112,50\} = 112,50 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112,5 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,22 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,22 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 178,89 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112,5 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,22 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,22 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 88,06 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{178,89; 88,06; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 3.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 112,5 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{112,5 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 555,65 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{86,95; 555,65\} = 86,95 \text{ kN}$$

2. Řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 110 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 110 = 132,97 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 110 = 129,64 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot p + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 110 + 0,5 \cdot 110 = 112,5 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = \min\{155,95; 149,28; 132,97; 112,5\} = 112,5 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112,5 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,22 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,22 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 178,89 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112,5 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,22 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,22 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 88,06 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{178,89; 88,6; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 112,5 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{112,5 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 555,65 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{86,95; 555,65\} = 86,95 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$\begin{aligned} M_{j,Rd} &= \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 2 \cdot 86,95 \cdot 10^3 \cdot (72 + 187 + 297 + 412) \cdot 10^{-6} \\ &= 168,33 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{j,Rd} = 168,33 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 21,33 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na ohybovou únosnost ve směru osy z.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{105}{3 \cdot 18} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 1,69 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0}}{1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7}, \frac{2,8 \cdot \frac{40}{18}}{1,4 \frac{110}{18} - 1,7} \right\} = \min \left\{ \frac{6,22}{2,5}, \frac{6,85}{2,5} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 4 \cdot 48,31 = 193,24 \text{ kN} \geq V_{celk} = 10,53 \text{ kN}$$

Spoj vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

Odolnost proti prokluzu

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87,92 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,sd})}{\gamma_{Ms}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot (87,92 - 0,8 \cdot 7,57 \cdot 1,26)}{1,30} \\ = 30,88 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 2,63 \text{ kN}$$

Odolnost v protlačení

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{27,7 + 24}{2} = 25,85 \text{ mm}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 0,02585 \cdot 0,016 \cdot 510 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} \\ = 305,85 \text{ kN} \geq F_{t,Rd} = 6,88 \cdot 1,26 = 8,67 \text{ kN}$$

Kombinace stříhu a tahu

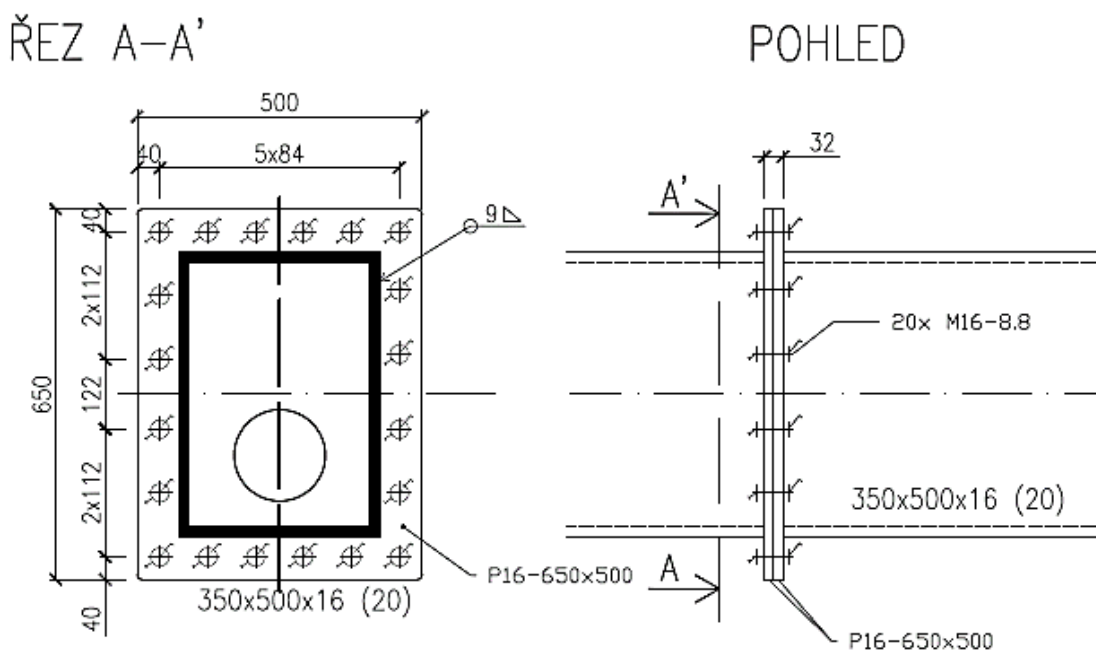
$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Ed}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{10,53}{4 \cdot 48,31} + \frac{151,37}{1,4 \cdot 86,95 \cdot 10} = 0,229 \leq 1,0$$

Stýčnick vyhovuje na kombinaci stříhu a tahu.

4.5.4 Montážní šroubovaný přípoj s čelními deskami podélného nosníku

Montážní přípoj je realizován pomocí čelních desek, na konstrukci sloupu jsou připraveny konzolky s čelními deskami, na které je přišroubován podélný nosník. Tento přípoj je symetrický na každé straně sloupu a na opačné straně od připojení podélného nosníku je připojena k čelní desce pomocí šroubů konzola, která slouží pro umístění nárazníku vozíku.



Obr. 81: Šroubový přípoj podélného nosníku ke sloupu pomocí čelních desek

Maximální vnitřní síly podélný nosník:

$$N_{Ed,max} = 36,48 \text{ kN}$$

$$V_{Y,Ed,max} = 99,53 \text{ kN}$$

$$V_{Z,Ed,max} = 76,80 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 69,12 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 58,00 \text{ kNm}$$

$$V_{celk} = \sqrt{V_{y,Ed}^2 + V_{z,Ed}^2} = \sqrt{99,53^2 + 76,80^2} = 125,72 \text{ kN}$$

Maximální vnitřní síly konzola:

$$N_{Ed,max} = -90,03 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 0,10 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 39,53 \text{ kNm}$$

Síly působící na konzolu nárazníku jsou zanedbatelně velké, může být použit stejný typ šroubového montážního přípoje, případně s vynecháním spodní řady šroubů.

Návrh svaru

Účinná tloušťka svaru je navržena konzervativně na plnou únosnost.

$$a \geq 0,55 \cdot t_w = 0,55 \cdot 16 = 8,8 \text{ mm}$$

$$a = 9,00 \text{ mm}$$

Stanovení nejmenší tloušťky, při které nedochází k páčení:

$$t_e = 4,3 \left(\frac{b \cdot d^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{35 \cdot 16^2}{40} \right)^{\frac{1}{3}} = 26,11 \text{ mm} \geq 16 \text{ mm}$$

Musí se posoudit vliv páčení.

$$\gamma_P = 1 + 0,005 \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \frac{26,11^3 - 16^3}{16^2} = 1,27$$

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy y

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 112 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 112 = 133,97 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 112 = 130,64 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 112 + 0,5 \cdot 112 = 112 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 112 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,21 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,21 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 178,08 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 112 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,21 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,21 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 87,88 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{178,08; 87,88; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 112 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{112 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 553,182 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{86,95; 553,18\} = 86,95 \text{ kN}$$

2. Řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 122 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 122 = 138,97 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 122 = 135,64 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 112 + 0,5 \cdot 122 = 117 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 117 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 117 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,31 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,31 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 186,140 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 122 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,31 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,31 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 89,67 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 135,69 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{186,14; 89,67; 86,95\} = 86,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 112 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{112 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 553,182 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{135,69; 553,18\} = 86,95 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$\begin{aligned} M_{j,Rd} &= \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 173,90 \cdot 10^3 \cdot (69 + 181 + 293 + 405) \cdot 10^{-3} \\ &= 543,40 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_{j,Rd} = 164,86 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 69,12 \text{ kNm}$$

Stýčník vyhovuje na ohybovou únosnost ve směru osy y.

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy z

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 9 = 24,82 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 84 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 24,82 = 155,95 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 24,82 + 1,25 \cdot 40 = 149,28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 24,82 + 0,5 \cdot 84 = 119,97 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 24,82 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 84 = 116,64 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 84 + 0,5 \cdot 84 = 84 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 84 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 84 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,66 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 1,66 \cdot 10^6}{24,82} \cdot 10^{-3} = 133,76 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 84 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,66 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 24,82) = 31,03 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{1,66 \cdot 10^6 + 31,03 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{24,82 + 31,03} \cdot 10^{-3} = 78,03 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{133,76; 78,03; 86,95\} = 78,03 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{84 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 414,89 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{78,03; 414,89\} = 78,03 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 173,90 \cdot 10^3 \cdot (41 + 125 + 209 + 293) \cdot 10^{-3} \\ = 543,40 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 116,17 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 58,00 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na ohybovou únosnost ve směru osy z.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 245 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 75,38 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \frac{\frac{f_{ub}}{f_{up}}}{\frac{p_1}{3d_0} - 0,25}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = \min \left\{ \frac{\frac{800}{510}}{\frac{112}{3 \cdot 22} - 0,25}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = \min \left\{ \frac{1,57}{1,44}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0}}{1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{40}{22}}{1,4 \frac{84}{22} - 1,7}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = \min \left\{ \frac{5,09}{3,65}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 313,85 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{313,85; 75,38\} = 75,38 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 4 \cdot 75,38 = 301,52 \text{ kN} \geq V_{celk} = 125,72 \text{ kN}$$

Spoj vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

Odolnost proti prokluzu

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87,92 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,sd})}{\gamma_{Ms}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot (87,92 - 0,8 \cdot 4,50 \cdot 1,26)}{1,30} \\ = 32,07 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 31,43 \text{ kN}$$

Odolnost v protlačení

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{27,7 + 24}{2} = 25,85 \text{ mm}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 0,02585 \cdot 0,016 \cdot 510 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} \\ = 305,85 \text{ kN} \geq F_{t,Rd} = 4,50 \cdot 1,26 = 5,67 \text{ kN}$$

Kombinace stříhu a tahu

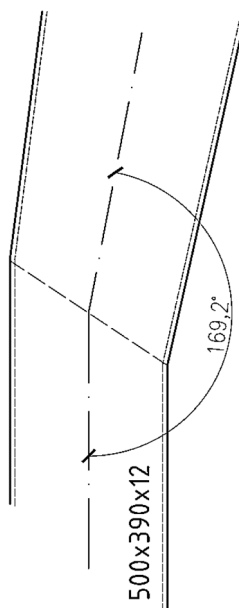
$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Ed}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{125,72}{4 \cdot 75,38} + \frac{36,48}{1,4 \cdot 173,90 \cdot 10} = 0,432 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci stříhu a tahu.

4.5.5 Posudek svarového zalomeného styčnicku sloupu

Sloup je v horní části tvořený náběhem. Náběh je realizován zalomením profilu a tento styčník je posouzený v souladu s ČSN 1993-1-8 tab. 7.16 [8].



Obr. 82: Zalomený svařovaný styčník

Rozhodující kombinace pro maximální tahovou normálovou sílu: NC280

$$N_{Ed,max} = 54,17 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 47,12 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 32,97 \text{ kNm}$$

Únosnosti průřezu

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y = 2,746 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3 = 9748,3 \text{ kN}$$

$$M_{y,pl,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 4,018 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1426,39 \text{ kNm}$$

$$M_{z,pl,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 4,772 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1694,06 \text{ kNm}$$

Posudek normálové síly

$$N_{Ed} \leq 0,2 \cdot N_{pl,Rd}$$

$$N_{Ed} = 54,17 \text{ kN} \leq 0,2 \cdot 9748,30 = 1949,66 \text{ kN}$$

Splněno.

Posudek kombinace ohybového momentu a normálové síly

Koeficient κ_{90° pro $\theta = 90^\circ$:

$$\kappa_{90^\circ} = \frac{3\sqrt{\frac{b_0}{h_0}}}{\left[\frac{b_0}{h_0}\right]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{b_0}{h_0}} = \frac{3\sqrt{\frac{390}{500}}}{\left[\frac{390}{500}\right]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{390}{500}} = 3,623$$

Koeficient $\kappa_{151,8^\circ}$ pro $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$:

$$\kappa_{151,8^\circ} = 1 - \left(\sqrt{2} \cos \frac{\theta}{2}\right) (1 - \kappa_{90^\circ}) = 1 - \left(\sqrt{2} \cos \frac{169,2}{2}\right) (1 - 3,623) = 1,349$$

$$\frac{N_{pl,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,pl,Ed}}{M_{y,pl,Rd}} + \frac{M_{z,pl,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} \leq \kappa$$

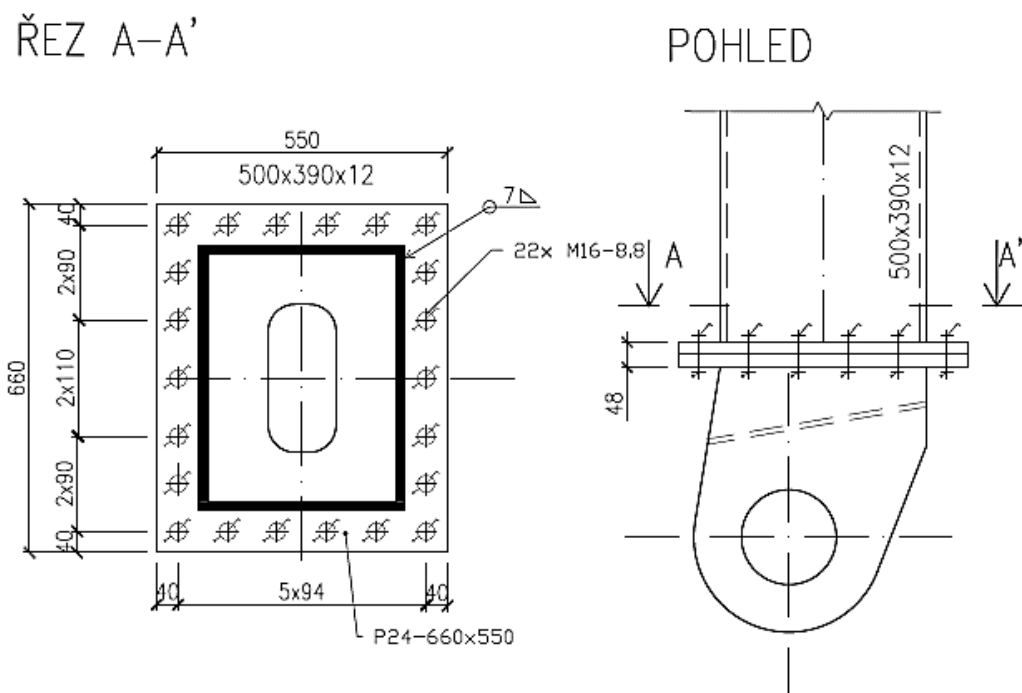
$$\frac{54,17}{9748,30} + \frac{47,12}{1426,39} + \frac{32,97}{1694,06} \leq \kappa$$

$$0,006 + 0,033 + 0,019 = 0,058 \leq 1,349$$

Zalomený styčník vyhovuje.

4.5.6 Posudek šroubového přípoje v místě umístění čepového spoje rozrušovače k vozíku

Konstrukce čepu je ukončena čelní deskou tloušťky 24 mm, která je montážně připojena pomocí šroubů M16 třídy pevnosti 8.8 k čelní desce ve spodní části sloupu vozíku. Jedná se o momentový přípoj, který je posouzený metodou komponent.



Obr. 83: Šroubový spoj v místě umístění čepu rozrušovače

Maximální vnitřní síly čepový přípoj:

$$N_{Ed,max} = 54,17 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed,max} = 69,91 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 54,32 \text{ kN}$$

$$M_{z,Ed,max} = 22,43 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed,max} = 15,95 \text{ kNm}$$

$$V_{celk} = \sqrt{V_{y,Ed}^2 + V_{z,Ed}^2} = \sqrt{69,91^2 + 54,32^2} = 88,53 \text{ kN}$$

Návrh svaru

Účinná tloušťka svaru je navržena konzervativně na plnou únosnost.

$$a \geq 0,55 \cdot t_w = 0,55 \cdot 12 = 6,6 \text{ mm}$$

$$a = 7,00 \text{ mm}$$

Stanovení nejmenší tloušťky, při které nedochází k páčení:

$$t_e = 4,3 \left(\frac{b \cdot d^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{40 \cdot 24^2}{40} \right)^{\frac{1}{3}} = 35,77 \text{ mm} \geq 24 \text{ mm}$$

Dochází k páčení šroubů.

$$\gamma_P = 1 + 0,005 \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \frac{35,77^3 - 16^3}{16^2} = 1,81$$

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy y

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 7 = 32,08 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 90 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 32,08 = 201,56 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 32,08 + 1,25 \cdot 40 = 178,32 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 32,08 + 0,5 \cdot 90 = 145,78 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} L_{eff,4p} &= 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 32,08 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 90 \\ &= 134,16 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 90 + 0,5 \cdot 90 = 90 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 90 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 90 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,78 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 1,78 \cdot 10^6}{32,08} \cdot 10^{-3} = 110,10 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 90 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,78 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 32,08) = 40 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{1,78 \cdot 10^6 + 40,00 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{32,08 + 40} \cdot 10^{-3} = 72,95 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{110,10; 72,95; 86,95\} = 72,95 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 90 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{90 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 444,52 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{72,95; 444,50\} = 72,95 \text{ kN}$$

Pro ostatní řady šroubů se konzervativně uvažuje únosnost T-profilu jako pro první řadu.

Návrhová momentová únosnost

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 145,90 \cdot 10^3 \cdot (40 + 130 + 240 + 350 + 440) \cdot 10^{-3} \\ = 175,08 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 175,08 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 15,95 \text{ kNm}$$

Styčník vyhovuje na ohybovou únosnost.

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy z

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 7 = 32,08 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 94 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 32,08 = 201,56 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 32,08 + 1,25 \cdot 40 = 178,32 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 32,08 + 0,5 \cdot 94 = 147,78 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 32,08 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 94 \\ = 136,16 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 94 + 0,5 \cdot 94 = 94 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 94 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 1,86 \cdot 10^6}{32,08} \cdot 10^{-3} = 115,96 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 94 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 32,08) = 40 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{1,86 \cdot 10^6 + 40 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{32,08 + 40} \cdot 10^{-3} = 74,06 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{115,96; 74,06; 86,95\} = 74,06 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 94 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{94 \cdot 16 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 464,58 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{74,06; 464,58\} = 74,06 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 148,12 \cdot 10^3 \cdot (44 + 138 + 232 + 326) \cdot 10^{-3} \\ = 109,61 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 109,61 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 22,43 \text{ kNm}$$

Styčník vyhovuje na ohybovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \frac{\frac{f_{ub}}{f_{up}}}{\frac{p_1}{3d_0} - 0,25}, \frac{\frac{800}{510}}{\frac{90}{3 \cdot 18} - 0,25} \right\} = \min \left\{ \frac{1,57}{1,0}, \frac{1,42}{1,0} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0}}{1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7}, \frac{2,8 \cdot \frac{40}{18}}{1,4 \frac{84}{18} - 1,7} \right\} = \min \left\{ \frac{6,22}{2,5}, \frac{4,83}{2,5} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů v okrajích.

$$F_{Rd} = 4 \cdot 48,31 = 193,24 \text{ kN} \geq V_{celk} = 88,53 \text{ kN}$$

Spoj jistě vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

Odolnost proti prokluzu

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87,92 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,sd})}{\gamma_{Ms}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot (87,92 - 0,8 \cdot 2,46 \cdot 1,81)}{1,30} \\ = 32,44 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 22,13 \text{ kN}$$

Odolnost v protlačení

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{27,7 + 24}{2} = 25,85 \text{ mm}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 0,02585 \cdot 0,016 \cdot 510 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3}$$

$$= 305,85 \text{ kN} \geq F_{t,Rd} = 2,46 \cdot 1,81 = 4,45 \text{ kN}$$

Kombinace stříhu a tahu

$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Ed}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{88,53}{4 \cdot 48,31} + \frac{54,17}{1,4 \cdot 148,12 \cdot 11} = 0,481 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci stříhu a tahu.

4.5.7 Připoj skloněné výztuhy pomocí čelních desek

Část rovného prvku délky 150 mm profilu SHS 150x150x8 je navařen na sloup již v dílně a je zde připravena čelní deska s předvrtanými otvory pro šrouby M16 pevnostní třídy 8.8. Montážní spoj je proveden pomocí čelních desek tloušťky 16 mm.

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 44,21 \text{ kN}$$

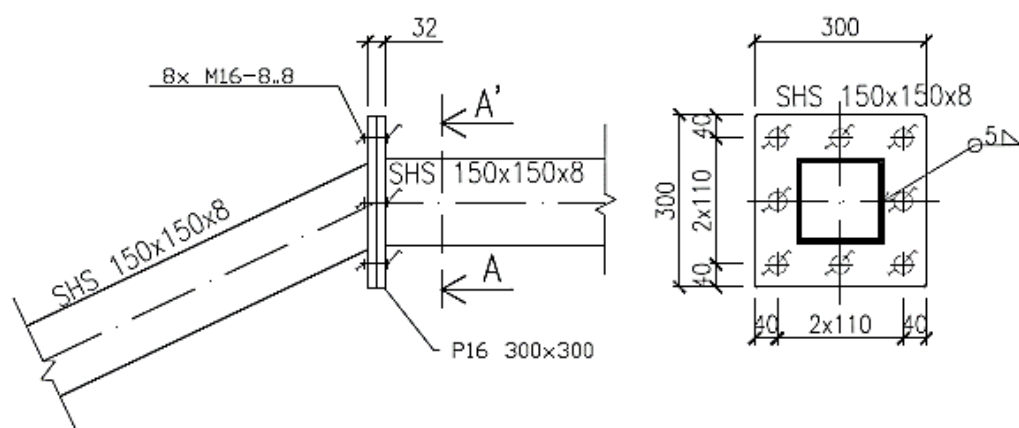
$$V_{z,Ed,max} = 0,28 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 1,69 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 1,14 \text{ kNm}$$

POHLED

ŘEZ A-A'



Obr. 84: Šroubový spoj skloněné výztuhy s čelními deskami

Návrh svaru

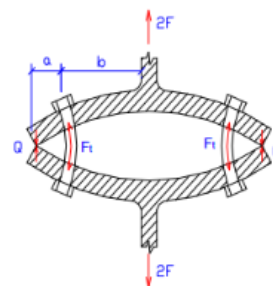
Účinná tloušťka svaru je navržena konzervativně na plnou únosnost.

$$a \geq 0,55 \cdot t_w = 0,55 \cdot 8 = 4,4 \text{ mm}$$

$$a = 5,00 \text{ mm}$$

Stanovení nejmenší tloušťky, při které nedochází k páčení:

$$t_e = 4,3 \left(\frac{b \cdot d^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{35 \cdot 16^2}{40} \right)^{\frac{1}{3}} = 26,11 \text{ mm} \geq 16 \text{ mm}$$



Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy y

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6 = 33,21 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 110 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 33,21 = 208,66 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 33,21 + 1,25 \cdot 40 = 182,84 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 33,21 + 0,5 \cdot 110 = 159,33 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} L_{eff,4p} &= 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 33,21 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 110 \\ &= 146,42 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 110 + 0,5 \cdot 110 = 110 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 110 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,17 \cdot 10^6}{33,21} \cdot 10^{-3} = 130,68 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 33,21) = 40 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,17 \cdot 10^6 + 40 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{33,21 + 40} \cdot 10^{-3} = 77,15 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{130,68; 77,15; 86,95\} = 77,15 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 110 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{110 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 271,65 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{77,15; 271,65\} = 77,15 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 154,30 \cdot 10^3 \cdot 71 \cdot 10^{-6} = 10,96 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 10,96 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 1,69 \text{ kNm}$$

V druhém směru namáhání ohybovým momentem platí stejná únosnost.

$$M_{j,Rd} = 10,96 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 1,14 \text{ kNm}$$

Styčník vyhovuje na ohybovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčníku

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otlačení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{110}{3 \cdot 18} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 1,78 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{40}{18} \\ 1,4 \frac{110}{18} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 6,22 \\ 6,86 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů v okrajích.

$$F_{Rd} = 4 \cdot 48,31 = 193,24 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 0,14 \text{ kN}$$

Spoj jistě vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

Odolnost proti prokluzu

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87,92 \text{ kN}$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \eta \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 F_{t,sd})}{\gamma_{Ms}} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,5 \cdot (87,92 - 0,8 \cdot 5,53 \cdot 1,22)}{1,30} \\ = 31,74 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 0,035 \text{ kN}$$

Odolnost v protlačení

$$d_m = \frac{d_0 + d_1}{2} = \frac{27,7 + 24}{2} = 25,85 \text{ mm}$$

$$B_{b,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 0,02585 \cdot 0,016 \cdot 510 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3}$$
$$= 305,85 \text{ kN} \geq F_{t,Rd} = 5,53 \cdot 1,22 = 6,75 \text{ kN}$$

4.5.8 Přípoj spodní výztuhy pomocí čelních desek

Na sloup je přivařen v dílně část nosníku profilu SHS 150x150x8 s čelní deskou, na kterou se poté šroubovým spojem připojí spodní část výztuhy.

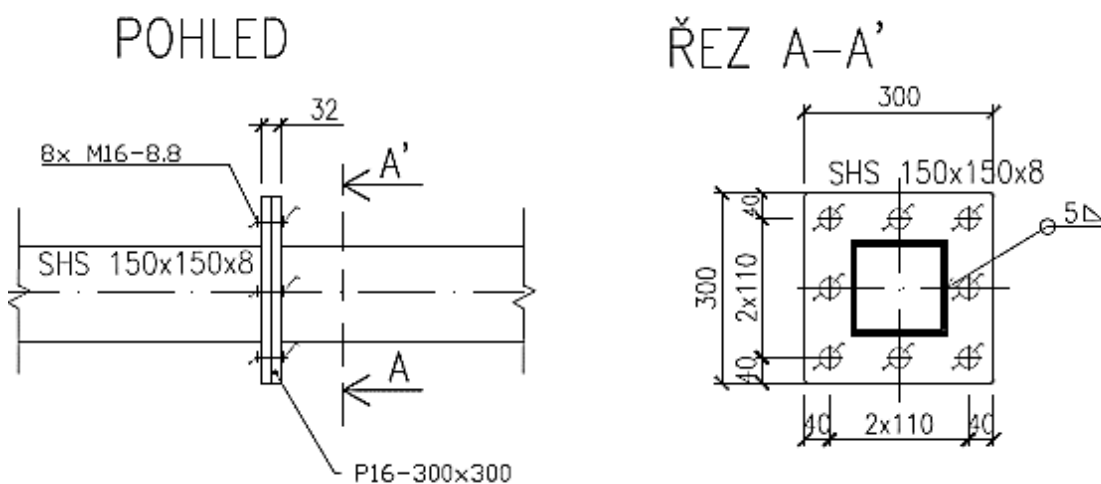
Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 91,87 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 0,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 0,76 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 1,77 \text{ kNm}$$



Obr. 85: Šroubový spoj skloněné výztuhy s čelními deskami

Stanovení náhradního T-profilu pro ohyb kolem osy y

Náhradní T-profil se skládá z jednoho šroubu a z jedné výztuhy (představuje stěnu uzavřeného profilu).

1. Vnitřní řada šroubu

$$m_{p1} = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w = 40 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 6 = 33,21 \text{ mm}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

$$p = 110 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 33,21 = 208,66 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = 4 \cdot m_{p1} + 1,25e_p = 4 \cdot 33,21 + 1,25 \cdot 40 = 182,84 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 33,21 + 0,5 \cdot 110 = 159,33 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 33,21 + 0,625 \cdot 40 + 0,5 \cdot 110 = 146,42 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = 0,5 \cdot d_2 + 0,5 \cdot p = 0,5 \cdot 110 + 0,5 \cdot 110 = 110 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu na čelní desce:

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 110 \text{ mm}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{2 \cdot 2,17 \cdot 10^6}{33,21} \cdot 10^{-3} = 130,68 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{ep} = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(40; 1,25 \cdot 33,21) = 40 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{M_{pl,2,Rd} + n_{ep} \cdot F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2,17 \cdot 10^6 + 40 \cdot 86,95 \cdot 10^3}{33,21 + 40} \cdot 10^{-3} = 77,15 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = F_{t,Rd} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{130,68; 77,15; 86,95\} = 77,15 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna nosníku v tahu

$$b_{eff,t,wb} = L_{effb} = 110 \text{ mm}$$

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{110 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 271,65 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost první řady šroubů

$$F_{t,Rd,Row} = \min\{F_{t,wb,Rd}; F_{T,Rd}\} = \min\{77,15; 271,65\} = 77,15 \text{ kN}$$

Návrhová momentová únosnost

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r \cdot F_{t,Rd,Row} = 154,30 \cdot 10^3 \cdot 71 \cdot 10^{-6} = 10,96 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 10,96 \text{ kNm} \geq M_{y,1,Ed,př} = 0,76 \text{ kNm}$$

V druhém směru namáhání ohybovým momentem platí stejná únosnost.

$$M_{j,Rd} = 10,96 \text{ kNm} \geq M_{z,1,Ed,př} = 1,77 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na ohybovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubu ve stříhu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \frac{f_{ub}}{f_{up}}, \frac{p_1}{3d_0} - 0,25, 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{800}{510}, \frac{80}{3 \cdot 18} - 0,25, 1,0 \right\} = \min \left\{ 1,57, 1,23, 1,0 \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0}, 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7, 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 \cdot \frac{40}{18}, 1,4 \frac{80}{18} - 1,7, 2,5 \right\} = \min \left\{ 6,22, 4,52, 2,5 \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

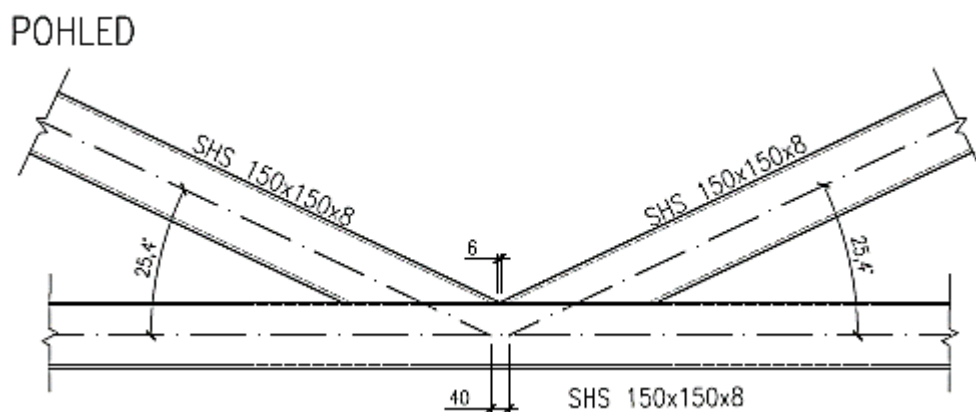
$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů v okrajích.

$$F_{Rd} = 4 \cdot 48,31 = 193,24 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 0,65 \text{ kN}$$

Spoj jistě vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

4.5.9 Svařovaný K styčník výztuh s mezerou



Obr. 86: Svařovaný K styčník výztuh

Maximální vnitřní síly:

$$N_{1,Ed,max} = -42,82 \text{ kN}$$

$$M_{1,y,Ed,max} = 0,97 \text{ kNm}$$

$$M_{1,z,Ed,max} = 1,21 \text{ kNm}$$

$$N_{2,Ed,max} = +44,85 \text{ kN}$$

$$M_{2,y,Ed,max} = 0,97 \text{ kNm}$$

$$M_{2,z,Ed,max} = 1,21 \text{ kNm}$$

$$N_{0,Ed,max} = 91,87 \text{ kN}$$

$$M_{0,y,Ed,max} = 0,57 \text{ kNm}$$

$$M_{0,z,Ed,max} = 1,77 \text{ kNm}$$

Konstrukční požadavky

$$0,2 \leq \frac{d}{d_0} = \frac{150}{150} = 1,00$$

$$10 \leq \frac{d_0}{t_0} = \frac{150}{8} = 18,75 \leq 50$$

Porušení povrchu pásu

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{150}{2 \cdot 8} = 9,375$$

$$\beta = \frac{b_1}{d_0} = \frac{150}{150} = 1,00$$

$$\begin{aligned} N_{p,Ed} &= N_{0,Ed} - \sum_i N_{i,Ed} \cos \theta = 91,87 - 44,85 \cdot \cos(25,4^\circ) + 42,82 \cdot \cos(25,4^\circ) \\ &= 90,04 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{0,pi}} = \frac{90,04}{4,32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,57 \cdot 10^3}{226 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,77 \cdot 10^3}{226 \cdot 10^{-6}} = 10,37 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}} = \frac{10,37}{355} = 0,029 \geq 0,00 \quad k_p \cong 1,00$$

Porušení povrchu pásu

$$\begin{aligned} N_{1,Rd} &= \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_1 \cdot \gamma_{M5}} \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) \\ &= \frac{8,9 \cdot 1,00 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,008^2 \cdot \sqrt{9,375}}{\sin(25,4^\circ) \cdot 1,00} \left(\frac{150 + 150 + 150 + 150}{4 \cdot 150} \right) \cdot 10^{-3} \\ &= 1443,42 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$N_{1,Rd} = 1443,42 \text{ kN} \geq N_{2,Ed,max} = +44,85 \text{ kN}$$

Porušení pásu smykem

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 6,14^2}{3 \cdot 8^2}}} = 0,748$$

$$A_v = \frac{2h_0 + \alpha b_0}{t_0} = \frac{2 \cdot 150 + 0,748 \cdot 150}{8} = 51,53 \text{ mm}^2$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot A_v}{\sqrt{3} \sin(\theta_1)}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 51,53 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3} \sin(25,4^\circ)}}{1,00} = 2462,28 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = 2462,28 \text{ kN} \geq N_{2,Ed,max} = +44,85 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} N_{0,Rd} &= \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \right)^2} \right] = \\ &= \left[(4,32 \cdot 10^{-2} - 51,53 \cdot 10^{-4}) 355 \cdot 10^6 + 51,53 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^6 \sqrt{1 - 0} \right] \\ &= 15336 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$N_{0,Rd} = 15336 \text{ kN} \geq N_{0,Ed,max} = 91,87 \text{ kN}$$

Porušení mezipásového prutu

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i = \frac{10}{150} \frac{355 \cdot 8}{355 \cdot 8} 150 = 80 \text{ mm} \leq b_i = 150 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} N_{1,Rd} &= \frac{f_{y0} \cdot t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}} \\ &= \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,008 (2 \cdot 0,15 - 4 \cdot 0,008 + 0,15 + 0,08)}{1,00} = 1414,32 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$N_{1,Rd} = 1414,23 \text{ kN} \geq N_{2,Ed,max} = +44,85 \text{ kN}$$

Prolomení smykem

$$\beta \leq \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) = \left(1 - \frac{1}{9,375}\right) = 0,893$$

Prolomení smykem není potřeba posuzovat.

Svařovaný K styčník vyhovuje.

4.6 Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce vozíku

V této kapitole je proveden posudek konstrukce vozíku MBSk 600 s ohledem na splnění požadavků mezního stavu použitelnosti. Výsledné přetvoření, které vzniká od působení dynamického a provozního zatížení na konstrukci musí splňovat limity deformací v souladu s ČSN EN 1993-1-1. Pro posouzení MSP jsou v software Scia Engineer uvažovány dílčí součinitelé zatížení v hodnotě 1,00.

4.6.1 Vodorovné prvky

- Nosník pod pohonným zařízením:

$$l = 900 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,3 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{200} = \frac{900}{200} = 4,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 4,5 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,3 \text{ mm}$$

Vodorovné příčné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

- Nosník tvořící podporu pochozímu roštu v příčném směru konstrukce:

$$l = 2400 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,7 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{2400}{250} = 9,6 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,6 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,7 \text{ mm}$$

Vodorovné příčné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

- Hlavní podélný nosník:

$$l = 11270 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{11270}{250} = 45,8 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 45,8 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 1,5 \text{ mm}$$

Vodorovné podélné nosníky vyhovují na svislý průhyb.

4.6.2 Svislé prvky

- Sloup konstrukce vozíku:

$$l = 11270 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 7,1 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 4,1 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{150} = \frac{2709}{150} = 18,06 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 18,06 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 7,1 \text{ mm}$$

Sloup konstrukce vyhovuje na svislý průhyb.

4.6.3 Výztužné prvky

- Skloněná výztuha:

$$l = 5654 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 4,7 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 2,0 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{5654}{250} = 22,62 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 22,62 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 4,7 \text{ mm}$$

Skloněné výztuhy vyhovují na svislý průhyb.

- Vodorovný nosník výztuhy:

$$l = 11300 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 7,1 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{11300}{250} = 45,2 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 45,2 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 7,1 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník výztuhy vyhovují na svislý průhyb.

5 Numerický model konstrukce vozíku v montážním stavu

Jelikož se podstatně liší statické schéma konstrukce v montážním a provozním stavu, je zapotřebí posoudit konstrukci vozíku samostatně právě ve stavu montážním. V tomto stavu je konstrukce montována dohromady mimo hlavní nosnou konstrukci a podepření vozíku je v místech pozdějšího připojení čepového přípoje rozrušovací brány charakterizováno jako kloubové.

V této kapitole budou posouzeny prvky, u kterých se průběhy vnitřních sil výrazně liší od stavu provozního, v případě, že prvky nejsou posouzeny, jistě vyhovují na vzniklé namáhání v montážním stavu.

5.1 Zatížení konstrukce kladkostroje

Na konstrukci kladkostroje je uvažováno působící zatížení:

- **Vlastní tíha** (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení užité** – revizní plošina, zábradlí, žebříky (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$)

Tíha zábradlí je stanovena odhadem na délku prvku v hodnotě 0,12 kN/m, hmotnost ocelového žebříku (předpokládá se žebřík zavěšený na konstrukci podlahy revizní lávky) s ochranným košem je stanovena odhadem na hodnotu 0,22 kN bodové osamělé síly.

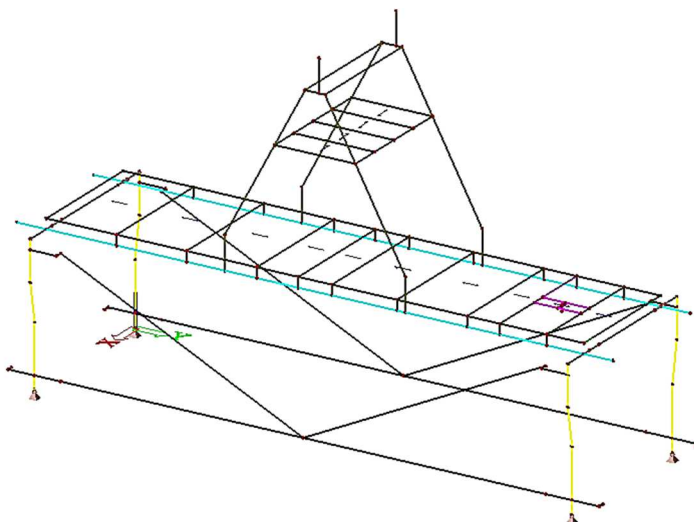
5.2 Zatížení konstrukce vozíku

Na konstrukci vozíku je uvažováno působící zatížení:

- **Vlastní tíha** (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení ostatní stálé** – zábradlí, pochozí rošt, reakce od vlastní tíhy rozrušovací brány (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Zatížení užité** – zábradlí, pochozí plocha (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$)

5.3 Numerický model vozíku v montážním stavu

Numerický model je vytvořen v pracovním prostoru XYZ a liší se oproti stavu provoznímu v uložení, které je situováno v místě přípoje budoucího čepu rozrušovací brány.

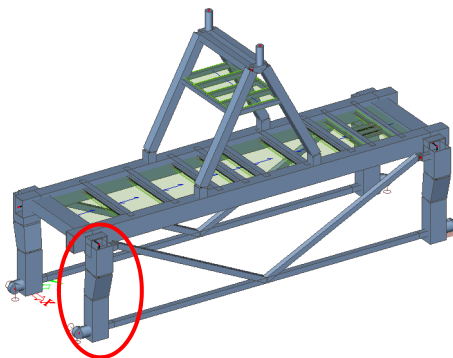


Obr. 87: Statické schéma konstrukce vozíku v montážním stavu

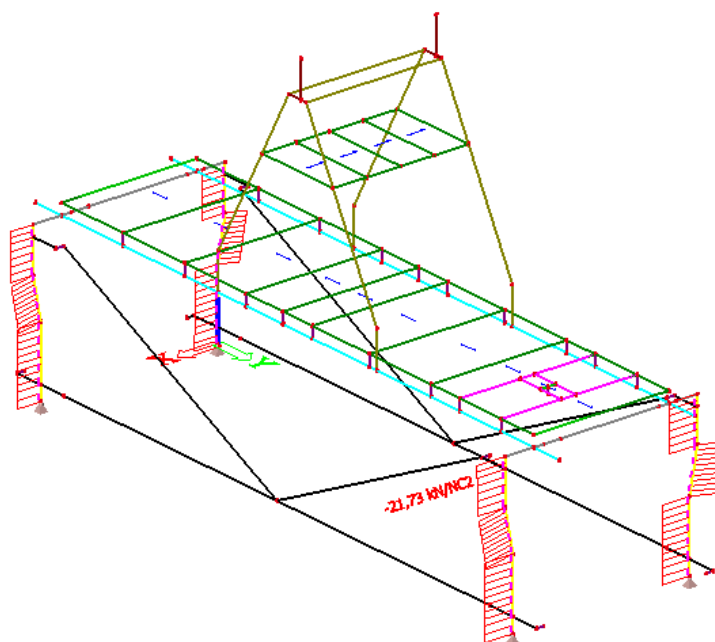
5.4 Návrh a statické posouzení nosných prvků konstrukce pro kladkostroj v montážním stavu

Konstrukce kladkostroje není v montážním stavu ovlivněna odlišným umístěním podpor konstrukce a vnitřní síly na prvcích jsou značně menší než ve stavu provozním, prvky jistě vyhovují na namáhání v montážním stavu. Značná odlišnost namáhání vzniká v případě sloupu, který se stává tlačенý namísto taženého v provozním stavu konstrukce.

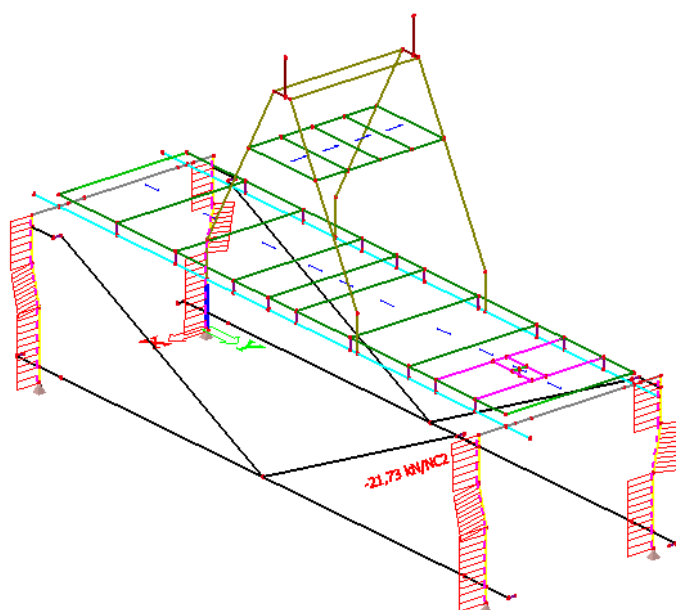
5.4.1 Návrh a posudek sloupu konstrukce vozíku



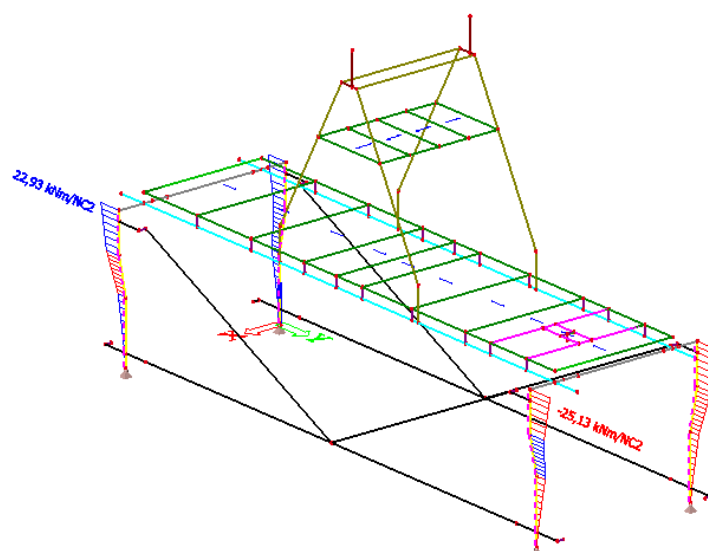
Obr. 88: Posuzovaný sloup konstrukce vozíku



Obr. 89: Hodnota normálové síly sloupu v návrhových hodnotách



Obr. 90: Hodnota ohybového momentu M_y sloupu v návrhových hodnotách

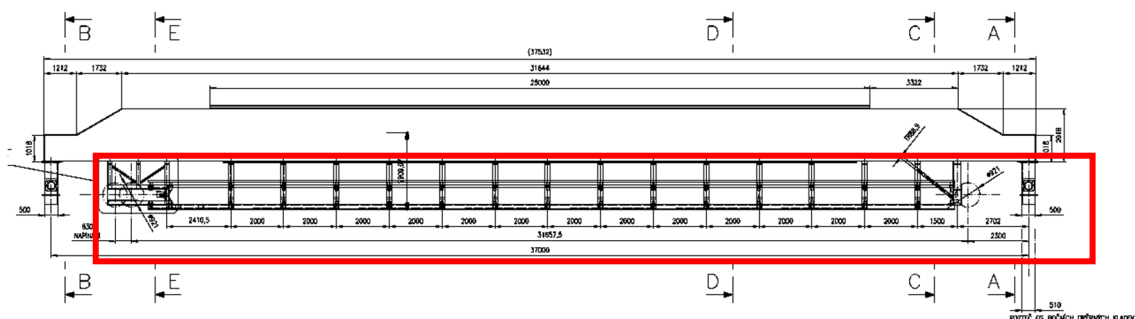


Obr. 91: Hodnota ohybového momentu M_z sloupu v návrhových hodnotách

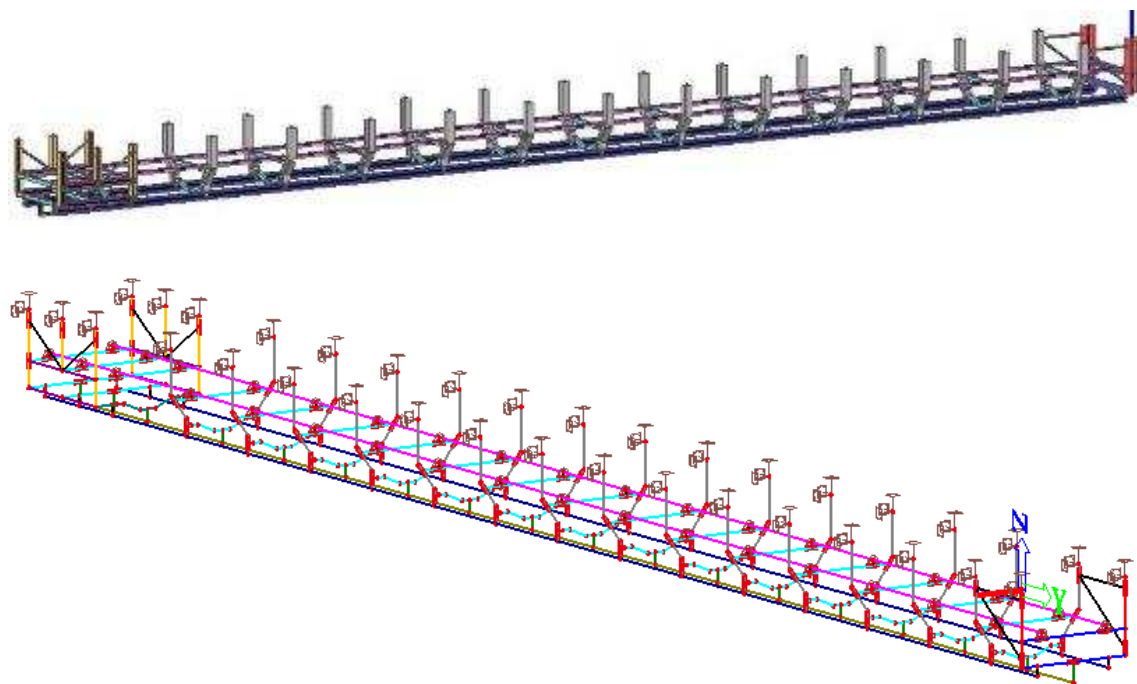
Průřez 500x390x12 jistě vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu v montážním stavu.

6 Návrh a posudek konstrukce pro vyhrnovací řetěz

Konstrukce je složená z válcovaných průřezů a je umístěná pod ocelovou konstrukcí mostu MBSk 600. V software Scia Engineer je konstrukce vymodelována samostatně jako prutová v obecném pracovním prostoru a zatížená dle poskytnutých výkresů [20] včetně technologického zatížení. Vetknuté podpory se nacházejí v místě připojení pomocí čelních desek na konstrukci mostu a reakcemi v těchto podporách v příslušných místech je poté hlavní nosník zatížen. Sloupy konstrukce jsou připojeny k hlavnímu nosníku shrnovače pomocí spoje s čelními deskami a čtyřmi šrouby M22 (i více), lze tento přípoj považovat za vetknuté uložení konstrukce.



Obr. 92: Posuzovaná konstrukce vyhrnovacího řetězu



Obr. 93: Prutový model konstrukce v software Scia Engineer

6.1 Zatížení konstrukce

Na konstrukci vyhrnovacího řetězu je uvažováno působící zatížení:

- **Vlastní tíha** – automaticky generována softwarem (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
- **Ostatní stálé**
 - zatížení od řetězu ve svislém směru v hodnotě 3 kN/m (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QR}=1,1$)
- **Zatížení užité - síla působící ve vyhrnovacím řetězu**
 - ve vodorovném směru v hodnotě 8,1 kN/m (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QR}=1,2$) byla stanovena z výkresů [20]
- **Zatížení užité** – mechanické zařízení (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_L=1,2$) bylo stanoveno z výkresů [20]
 - převodovka – bodová síla v hodnotě 75 kN
 - hřídel – bodová síla v hodnotě 15 kN
 - vodorovné účinky na pás v hodnotě 190 a 50 kN
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve svislém směru v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru kolmo k podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,02$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)
- **Zatížení dynamické** (zvoleno pro vyvažovací výložník) ve vodorovném směru v podélné ose konstrukce v hodnotě $\pm 0,07$ násobku vlastní tíhy konstrukce (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QD}=1,0$)

Hodnoty dynamického zatížení byly konzervativně zvoleny pro vodorovné prvky z hmotnosti uzavřeného profilu 150x100. Pro podélné nosníky profilu HEA200 se stanovily z příslušné hmotnosti pro tento profil. Svislé prvky jsou zatíženy dynamickým zatížením vycházejícím z hmotnosti pro jednotlivé profily.

Dynamické zatížení svislé a vodorovné ve směru podélné osy:

Sloup HEB300	$q_k = 117 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0819 \text{ kN/m}$
--------------	--

Sloup HEB160, HEA200	$q_k = 42,6 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,02982 \text{ kN/m}$
----------------------	--

Vodorovné nosníky	$q_k = 18,84 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,07) = \pm 0,0132 \text{ kN/m}$
-------------------	--

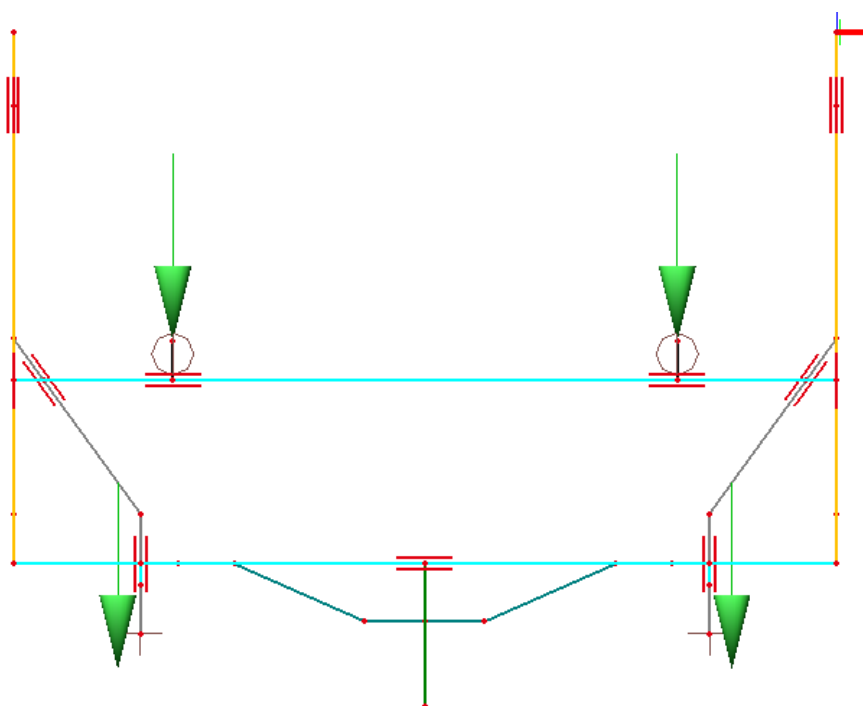
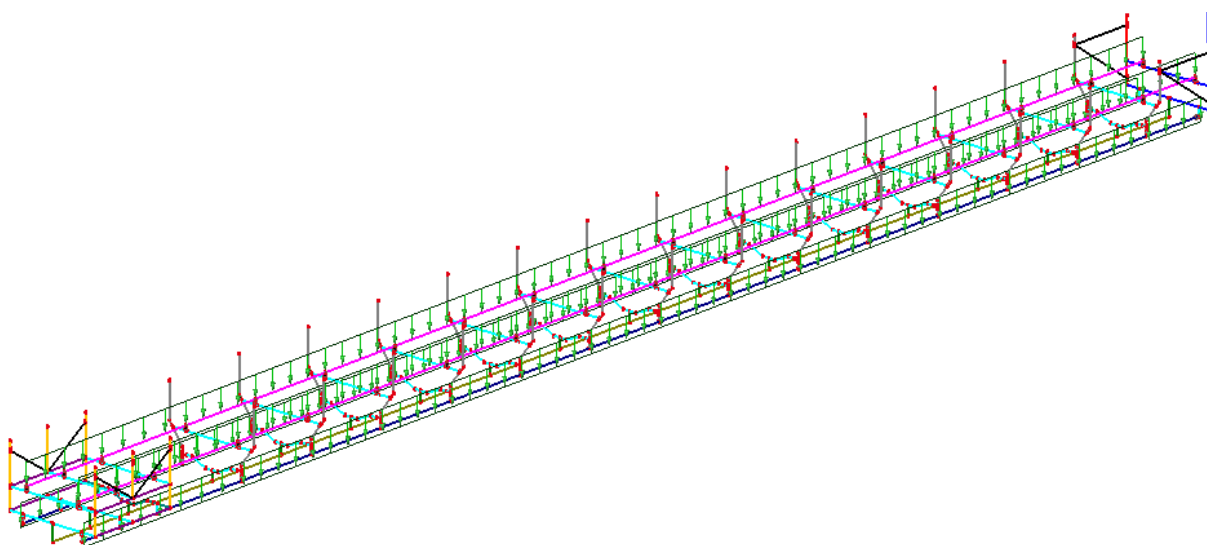
Dynamické zatížení vodorovné ve směru kolmém k podélné ose:

Sloup HEB300 $q_k = 117 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,0234 \text{ kN/m}$

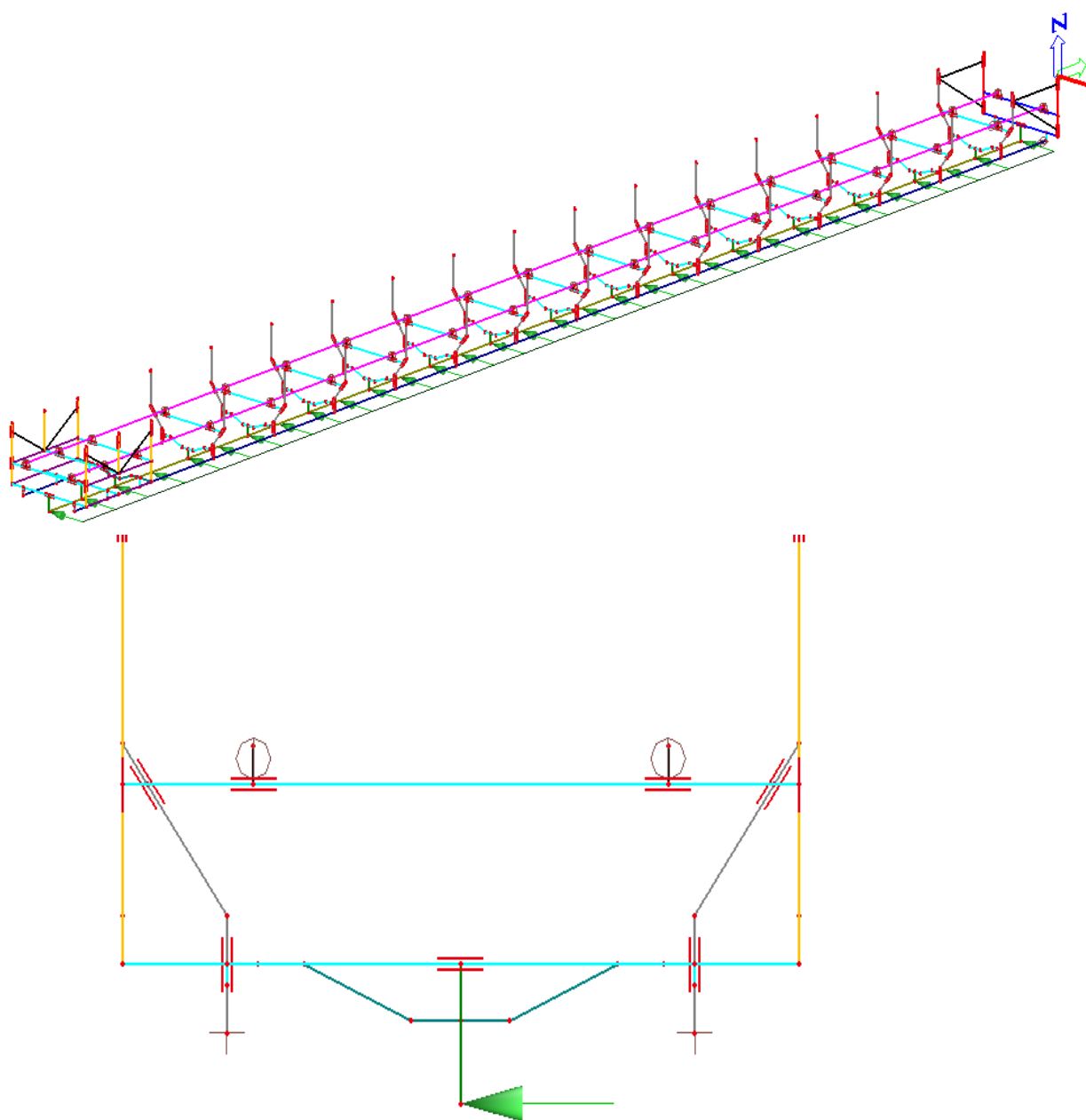
Sloup HEB160, HEA200 $q_k = 42,6 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,009 \text{ kN/m}$

Vodorovné nosníky $q_k = 18,84 \cdot 10^{-2} \cdot (\pm 0,02) = \pm 0,004 \text{ kN/m}$

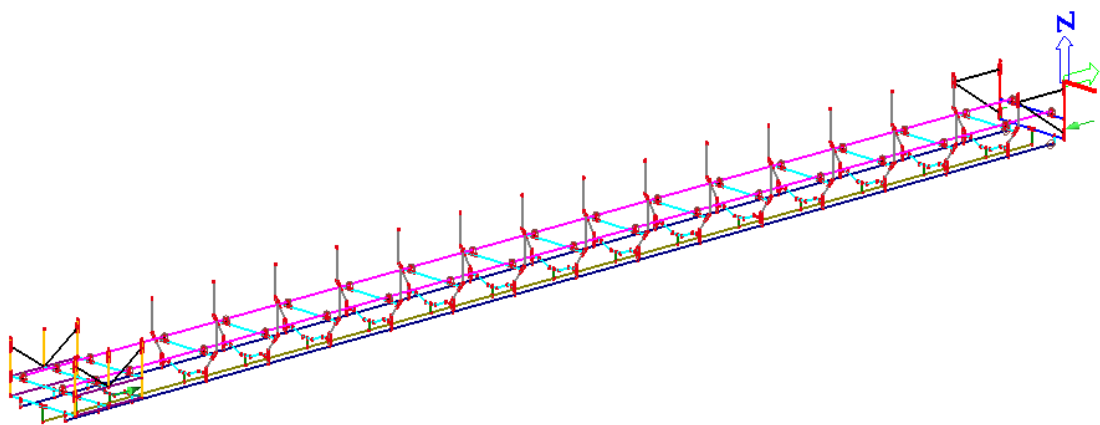
Hodnota kombinačního součinitele ψ je stanovena v souladu s ČSN 27 7080 dle tabulky 8 na hodnotu 0,95 a upraven v software Scia Engineer spolu s ostatními hodnotami dílčích součinitelů zatížení. Je použito kombinační pravidlo dle [13] pro vytvoření kombinací zatěžovacích stavů.



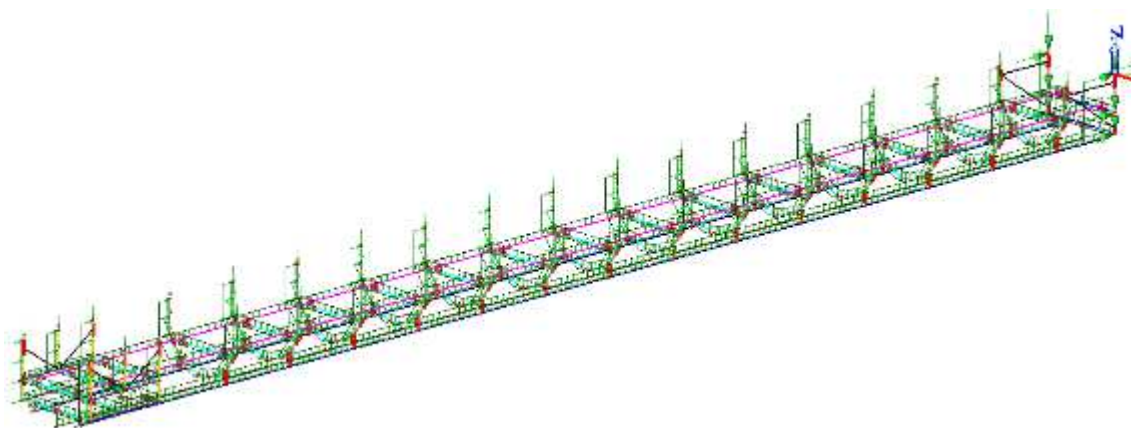
Obr. 94: Stálé zatížení - tíha řetězu



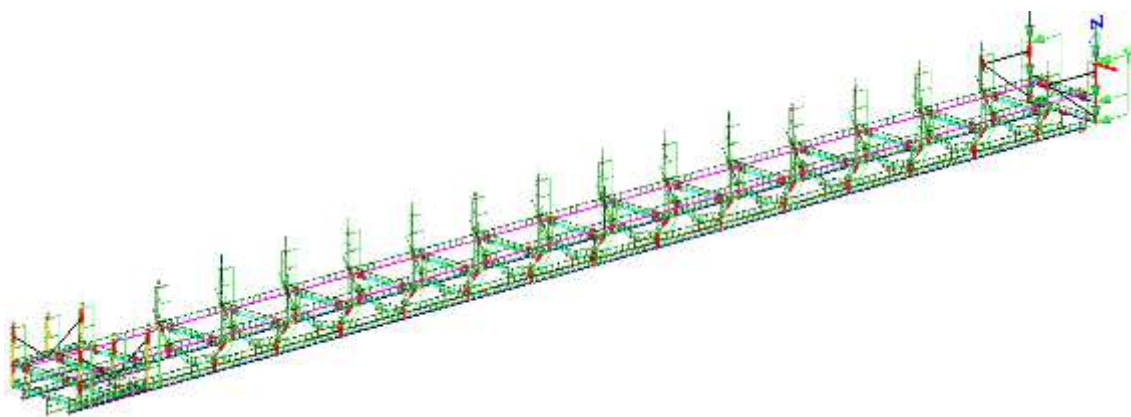
Obr. 95: Proměnné zatížení od vyhrnovacího řetězu



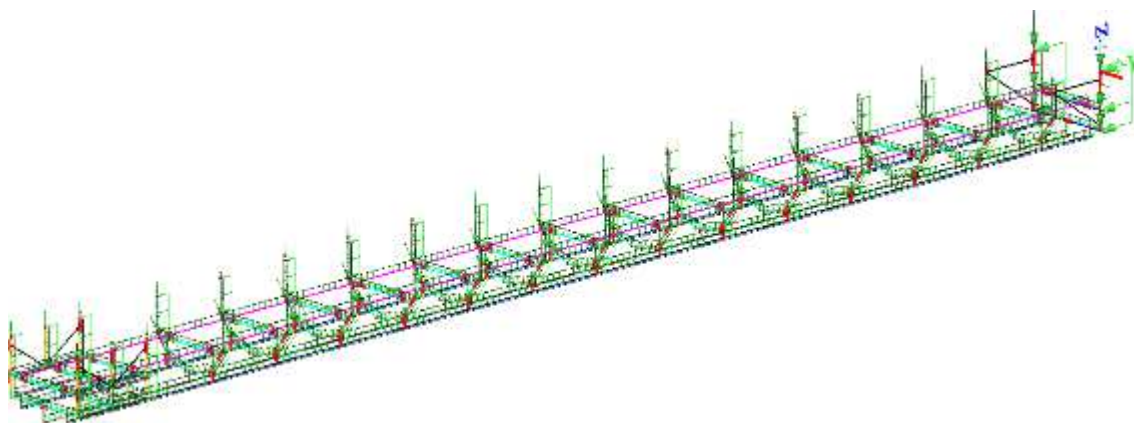
Obr. 96: Proměnné zatížení od pohonu vyhrnovacího řetězu



Obr. 97: Dynamické zatížení ve směru osy $z+$, $y+$ a $x+$



Obr. 98: Dynamické zatížení ve směru osy $z+$, $y-$ a $x+$



Obr. 99: Dynamické zatížení ve směru osy z+, y- a x-

6.2 Návrh a posudek vodorovného nosníku HEA200

Vodorovný nosník HEA 200 je posouzený na vzpěrnou únosnost, kombinaci ohybového a osového tlakového namáhání a na smyk.

Maximální vnitřní síly NC33:

$$N_{Ed,max} = -47,29 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 4,66 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 8,27 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = 8,12 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,26 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu HEA200

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{190 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 18}{6,5} = 20,62 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{190 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 18}{6,5} = 20,62 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{200 - 6,5 - 2 \cdot 18}{2 \cdot 10} = 7,88 \leq 10 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 8,14$$

Splněno – průřez třídy 2

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 5,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 82,8 \text{ mm}$$

$$i_z = 49,8 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 4,30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

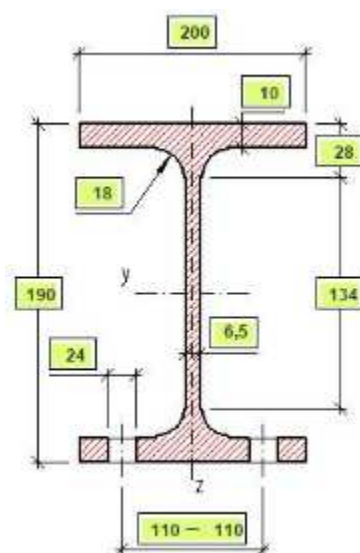
$$W_{z,pl} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = 3,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_z = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_w = 108 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 210 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$



Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC33

$$L_{cr,y} = 2410,5 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2410,5}{82,8} = 29,22$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{29,22}{76,40} = 0,382 \quad \dots \textit{křivka vzpěrnosti b} \quad \alpha = 0,34$$

$$* \textit{Válcovaný průřez} \quad \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 10 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,382 - 0,2) + 0,382^2] = 0,604$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,604 + \sqrt{0,604^2 - 0,382^2}} = 0,933$$

$$\chi_y = 0,933 \leq 1,00 \quad \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2410,5}{49,8} = 75,34$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{75,34}{76,40} = 0,986 \quad \dots \textit{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

$$* \textit{Válcovaný průřez} \quad \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 10 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_z - 0,2) + \overline{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,986 - 0,2) + 0,986^2] = 1,179$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,179 + \sqrt{1,179^2 - 0,986^2}} = 0,548$$

$$\chi_z = 0,548 \leq 1,00 \quad \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 2,4105} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 108 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 210 \cdot 10^{-9}}} = 1,505$$

$$C_1 = 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi \cdot (-0,095)}{1,00 \cdot 2,41,05} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 13,4 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 10^9 \cdot 210 \cdot 10^{-9}}} = -1,59$$

$$\zeta_j = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j)^2} - (C_2 \cdot \zeta_g - C_3 \cdot \zeta_j) \right] =$$

$$= \frac{1,13}{1,00} \left[\sqrt{1 + 1,505^2 + (0,46 \cdot (-1,59) - 0)^2} - (0,46 \cdot (-1,59) - 0) \right] = 3,029$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 3,029 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 1340 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 210 \cdot 10^3}}{2410,5} =$$

$$= 8,64 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{430 \cdot 10^3 \cdot 355}{8,64 \cdot 10^8}} = 0,420 \dots \text{křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 2,0.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,420 - 0,2) + 0,420^2]$$

$$= 0,602$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,602 + \sqrt{0,602^2 - 0,420^2}} = 0,968$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 5,83 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 2069,65 \text{ kN}$$

$$M_{y.Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 152,65 \text{ kNm}$$

$$M_{z.Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 2,04 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 72,42 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\alpha_{sy} = -0,60$$

$$\psi_z = -0,20$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8\alpha_s = \mathbf{0,580} \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = \mathbf{0,520} \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi = 0,360 \geq \mathbf{0,4}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \mathbf{0,583} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,593$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \mathbf{0,540} \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,540$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,328$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = \mathbf{0,986} \geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,968$$

Podmínka je splněna.

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{47,29}{\frac{0,833 \cdot 2069,65}{1,15}} + 0,583 \frac{4,66}{\frac{0,968 \cdot 152,65}{1,15}} + 0,328 \frac{8,27}{\frac{72,42}{1,15}} = \\ & = 0,032 + 0,022 + 0,043 = 0,097 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{47,29}{\frac{0,548 \cdot 2069,65}{1,15}} + 0,968 \frac{4,66}{\frac{0,968 \cdot 152,65}{1,15}} + 0,546 \frac{8,27}{\frac{72,42}{1,15}} = \\ & = 0,049 + 0,036 + 0,072 = 0,157 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$= \frac{47,29}{\frac{2069,65}{1,15}} + \frac{4,66}{\frac{152,65}{1,15}} + \frac{8,27}{\frac{72,42}{1,15}} = 0,026 + 0,035 + 0,131 = 0,192 \leq 1,00$$

Průřez HEA200 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC20

Prostý smyk

$$A_v = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,81 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 322,59 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 322,59 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 8,12 \text{ kN}$$

Průřez HEA200 vyhovuje na prostý smyk.

6.3 Posudek hlavní příčle konstrukce RHS 150x100x5

Pro hlavní příčli jsou uvažovány vzpěrné délky v délce systémové prvku ze software Scia Engineer, v důsledku použití geometricky nelineární statické analýzy.

Maximální vnitřní síly NC19:

$$N_{Ed,max} = 8,47 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = -2,52 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 1,44 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 10,85 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC13:

$$V_{z,Ed,max} = 4,47 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 2,09 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu RHS 150x100x5

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{150-2\cdot 5}{5} = 28 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{150-2\cdot 5}{5} = 28 \leq 38 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 30,92$$

Splněno – průřez třídy 2

Průřezové charakteristiky nosníku

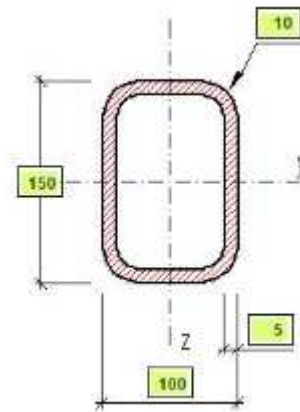
$$A = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 55,5 \text{ mm}$$

$$i_z = 40,5 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 0,883 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$



**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC360

$$L_{cr,y} = 2200 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2200}{55,5} = 39,64$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{39,64}{76,40} = 0,518 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } c \quad \alpha = 0,49$$

**Dutý průřez tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,518 - 0,2) + 0,518^2] = 0,712$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,712 + \sqrt{0,712^2 - 0,518^2}} = 0,833$$

$$\chi_y = 0,833 \leq 1,00 \text{ ... dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2200}{40,5} = 54,32$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{54,32}{76,40} = 0,711 \text{ ... křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* Dutý průřez tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,711 - 0,2) + 0,711^2] = 0,878$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,878 + \sqrt{0,878^2 - 0,711^2}} = 0,718$$

$$\chi_z = 0,718 \leq 1,00 \text{ ... dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 2,34 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 830,70 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 41,535 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,883 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 31,35 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,601$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,601$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{2,52}{\frac{0,832 \cdot 830,7}{1,15}} + 1,00 \frac{1,44}{\frac{1,00 \cdot 41,54}{1,15}} + 0,601 \frac{10,85}{\frac{31,35}{1,15}} = \\ & = 0,004 + 0,040 + 0,239 = 0,283 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{2,52}{\frac{0,718 \cdot 830,7}{1,15}} + 0,601 \frac{1,44}{\frac{1,00 \cdot 41,54}{1,15}} + 1,00 \frac{10,85}{\frac{31,35}{1,15}} = \\ & = 0,005 + 0,024 + 0,398 = 0,427 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{2,52}{\frac{830,7}{1,15}} + \frac{1,44}{\frac{41,54}{1,15}} + \frac{10,85}{\frac{31,35}{1,15}} = 0,003 + 0,040 + 0,398 = 0,441 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Prvek RHS 150x100x5 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{8,47}{\frac{830,7}{1,15}} + \frac{1,44}{\frac{41,54}{1,15}} + \frac{10,85}{\frac{31,35}{1,15}} = 0,012 + 0,040 + 0,398 = 0,450 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Prvek RHS 150x100x5 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC13

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,43 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15}{(0,15 + 0,10)} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{1,46 \cdot 10^{-3} \cdot 355}{1,15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^3 = 260,21 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 260,21 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 4,47 \text{ kN}$$

Průřez 150x100x5 vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 150x100x5 jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

6.4 Posudek krajní příčle konstrukce SHS 100x100x5

Maximální vnitřní síly NC18:

$$N_{Ed,max} = -7,73 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = 7,40 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = -4,80 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -3,29 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = -9,36 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,83 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu SHS 100x100x5

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{100-2 \cdot 5}{5} = 18 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{100-2\cdot 5}{5} = 18 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 38,40 \text{ mm}$$

$$i_z = 38,40 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 6,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 6,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC18

$$L_{cr,z} = 1520 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1520}{38,40} = 39,58$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{39,58}{76,40} = 0,518 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{c} \quad \alpha = 0,49$$

**Dutý průřez tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_z - 0,2) + \overline{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,518 - 0,2) + 0,518^2] = 0,712$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,712 + \sqrt{0,712^2 - 0,518^2}} = 0,833$$

$$\chi_z = 0,833 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$L_{cr,y} = 2200 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2200}{38,40} = 57,29$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{57,29}{76,40} = 0,750 \dots \text{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* Dutý průřez tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,750 - 0,2) + 0,750^2] = 0,916$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,916 + \sqrt{0,916^2 - 0,750^2}} = 0,694$$

$$\chi_y = 0,694 \leq 1,00 \dots \text{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,84 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 653,20 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,646 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 22,933 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,646 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 22,933 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,02$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = c_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01 \leq c_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,02$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,608$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,604$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{7,73}{\frac{0,694 \cdot 653,20}{1,15}} + 1,01 \frac{4,80}{\frac{1,00 \cdot 22,93}{1,15}} + 0,608 \frac{3,29}{\frac{22,93}{1,15}} = \\ & = 0,020 + 0,243 + 0,100 = 0,363 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{7,73}{\frac{0,833 \cdot 653,20}{1,15}} + 0,604 \frac{4,80}{\frac{1,00 \cdot 22,93}{1,15}} + 1,01 \frac{3,29}{\frac{22,93}{1,15}} = \\ & = 0,016 + 0,145 + 0,167 = 0,328 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{7,73}{\frac{653,20}{1,15}} + \frac{4,80}{\frac{22,93}{1,15}} + \frac{3,29}{\frac{22,93}{1,15}} = 0,014 + 0,241 + 0,165 = 0,420 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Prvek RHS 100x100x5 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace ohybového momentu a tahové normálové síly pro kombinaci NC18

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{7,40}{\frac{653,20}{1,15}} + \frac{4,80}{\frac{22,93}{1,15}} + \frac{3,29}{\frac{22,93}{1,15}} = 0,013 + 0,241 + 0,165 = 0,419 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Prvek RHS 100x100x5 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC20

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,10}{(0,10 + 0,10)} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 253,08 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 253,08 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 9,36 \text{ kN}$$

Průřez 100x100x5 vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 100x100x5 jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

6.5 Posudek vnitřní příčle konstrukce SHS 100x100x5

Maximální vnitřní síly pro skloněný prvek:

Maximální vnitřní síly NC20:

$$N_{Ed,max} = 19,62 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = -11,86 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 1,40 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 0,46 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = 10,39 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 3,50 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu SHS 100x100x5

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{100-2\cdot 5}{5} = 18 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{100-2\cdot 5}{5} = 18 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 38,40 \text{ mm}$$

$$i_z = 38,40 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 6,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 6,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,84 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 653,20 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,646 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 22,933 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,646 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 22,933 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu NC20

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{19,62}{653,20} + \frac{1,40}{22,93} + \frac{0,46}{22,93} = 0,035 + 0,070 + 0,023 = 0,128 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Prvek RHS 100x100x5 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC19

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{2,83 \cdot 10^{-3} \cdot 0,10}{(0,10 + 0,10)} = 1,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,42 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 253,08 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 253,08 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 10,39 \text{ kN}$$

Průřez 100x100x5 vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 100x100x5 jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

6.6 Posudek krajní příčle konstrukce RHS 120x80x5

Maximální vnitřní síly NC11 (s maximální tahovou silou):

$$N_{Ed,max} = 16,75 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 7,00 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 4,46 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC36 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -8,24 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 1,18 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 0,36 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = 17,69 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,58 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu SHS 120x80x5

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{120-2 \cdot 5}{5} = 22 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{120-2 \cdot 5}{5} = 22 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 1,90 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 32,00 \text{ mm}$$

$$i_z = 44,00 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 5,73 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 7,63 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

**Jedná se o dutý průřez – výsečové charakteristiky jsou nulové.*

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 674,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,573 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 20,34 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,763 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 27,09 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tahové normálové síly a ohybového momentu NC11

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$\frac{16,75}{\frac{674,50}{1,15}} + \frac{7,00}{\frac{20,340}{1,15}} + \frac{4,465}{\frac{27,09}{1,15}} = 0,029 + 0,396 + 0,189 = 0,614 \leq 1,00$$

Prvek RHS 120x80x5 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC36

$$L_{cr,y} = 2264 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2264}{32,00} = 70,75$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{70,75}{76,40} = 0,926 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } c \quad \alpha = 0,49$$

**Dutý průřez tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,926 - 0,2) + 0,926^2] = 1,107$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,107 + \sqrt{1,107^2 - 0,926^2}} = 0,584$$

$$\chi_y = 0,584 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$L_{cr,z} = 340 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{340}{38,40} = 7,73$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{7,73}{76,40} = 0,101 \leq 0,20 \text{ vzpěr ve směru osy } z - z \text{ lze zanedbat}$$

Výpočet klopení

Jedná se o dutý uzavřený průřez, který neklopí.

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 674,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 0,573 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 20,34 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,763 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 27,09 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\overline{\lambda}_y - 0,2) \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = 1,01 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = 1,01$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\overline{\lambda}_z - 0,2) \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = 1,00 \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = 1,01$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,599$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,607$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{8,24}{\frac{0,584 \cdot 674,50}{1,15}} + 1,01 \frac{1,18}{\frac{1,00 \cdot 20,34}{1,15}} + 0,599 \frac{0,36}{\frac{27,09}{1,15}} =$$

$$= 0,024 + 0,068 + 0,009 = 0,101 \leq 1,00$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{8,24}{\frac{1,00 \cdot 674,50}{1,15}} + 1,01 \frac{1,18}{\frac{1,00 \cdot 20,34}{1,15}} + 0,599 \frac{0,36}{\frac{27,09}{1,15}} =$$

$$= 0,014 + 0,041 + 0,015 = 0,070 \leq 1,00$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{8,24}{\frac{674,50}{1,15}} + \frac{1,18}{\frac{20,34}{1,15}} + \frac{0,36}{\frac{27,09}{1,15}} = 0,014 + 0,067 + 0,015 = 0,096 \leq 1,00$$

Prvek RHS 120x80x5 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC11

Prostý smyk

$$A_v = \frac{A \cdot h}{(b + h)} = \frac{1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08}{(0,12 + 0,08)} = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{7,6 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 135,45 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 135,45 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 17,69 \text{ kN}$$

Průřez 120x80x5 vyhovuje na prostý smyk.

Průřez 100x100x5 jistě vyhovuje na kombinaci smyku a kroucení.

6.7 Návrh a posudek sloupku HEB300

Sloup konstrukce je připojený k hlavnímu nosníku momentovým přípojem pomocí čelních desek tloušťky 30 mm. Z toho vyplývá, že v důsledku technologického zatížení konstrukce je sloup především tažený. S ohledem na získané vnitřní síly ze software Scia Engineer je sloup profilu HEB 300 posouzen s ohledem na tahovou únosnost, únosnost ve smyku a kombinaci tahového osového a ohybového namáhání.

Maximální vnitřní síly NC20:

$$N_{Ed,max} = -2,28 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = 158,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 101,28 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = -28,53 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = 121,73 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 1,11 \text{ kNm}$$

Zatřídění průřezu HEB300

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{300-2\cdot 19-2\cdot 27}{11} = 18,90 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{300-2\cdot 19-2\cdot 27}{11} = 18,90 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{300-11-2 \cdot 27}{2 \cdot 19} = 6,18 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 14,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 130 \text{ mm}$$

$$i_z = 75,80 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

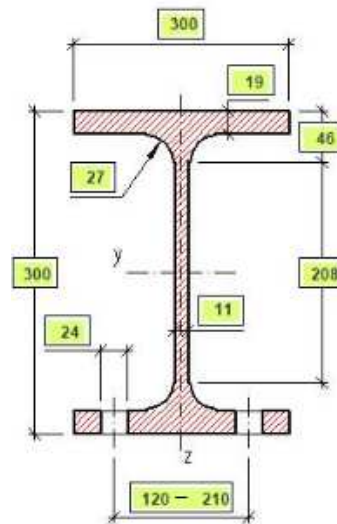
$$W_{z,pl} = 0,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$I_y = 2,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_z = 8,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_w = 1690 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 1,85 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$



Posudek kombinace ohybového momentu a tahové normálové síly pro kombinaci NC20

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 14,9 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 5289,50 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 1,87 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 663,85 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 0,87 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 308,85 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{158,50}{5289,50} + \frac{101,28}{663,85} + \frac{28,53}{308,85} = 0,034 + 0,175 + 0,106 = 0,315 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Průřez HEB300 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC20

Prostý smyk

$$A_v = 4,74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{4,74 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 844,79 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 844,79 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 121,73 \text{ kN}$$

Průřez HEB300 vyhovuje na prostý smyk.

6.8 Návrh a posudek sloupku HEB160

Maximální vnitřní síly NC35 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -31,27 \text{ kN}$$

Maximální vnitřní síly NC19 (s maximální tahovou silou):

$$N_{Ed,max} = 70,77 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 22,74 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 5,54 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC38:

$$V_{z,Ed,max} = 150,90 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,06 \text{ kNm}$$

Hodnota krouticího momentu je zanedbatelná.

Zatřídění průřezu HEB160

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{160-2 \cdot 13-2 \cdot 15}{8} = 13,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{160-2 \cdot 13-2 \cdot 15}{8} = 13,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{160-8-2 \cdot 15}{2 \cdot 13} = 4,69 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 67,8 \text{ mm}$$

$$i_z = 40,50 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 3,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 1,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = 24,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 8,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_w = 47,9 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 312 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC19

$$L_{cr,y} = 928 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{928}{67,8} = 13,69$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{13,69}{76,40} = 0,18 \leq 0,20 \text{ lze zanedbat vzpěr ve směru osy } z - z$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1418}{40,50} = 35,01$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{35,01}{76,40} = 0,458 \dots \textit{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

$$* \textit{Válcovaný průřez} \quad \frac{h}{b} = \frac{160}{160} = 1,00 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 13 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_z - 0,2) + \overline{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,458 - 0,2) + 0,458^2] = 0,668$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,668 + \sqrt{0,668^2 - 0,458^2}} = 0,866$$

$$\chi_z = 0,866 \leq 1,00 \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 0,928} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 47,9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 312 \cdot 10^{-9}}} = 2,136$$

$$C_1 = 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = 0$$

$$\zeta_j = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,13}{1,00} \left[\sqrt{1 + 2,136^2} \right] = 2,665$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 2,665 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 889 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 312 \cdot 10^3}}{928} =$$

$$= 19,59 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{354 \cdot 10^3 \cdot 355}{19,59 \cdot 10^8}} = 0,253 \dots \text{křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

* Válcovaný průřez $\frac{h}{b} = \frac{160}{160} = 1,00 \leq 2,0$.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,253 - 0,2) + 0,253^2] \\ = 0,538$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,538 + \sqrt{0,538^2 - 0,253^2}} = 0,987$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 5,43 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1927,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 125,67 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 1,70 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 60,35 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\overline{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\overline{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01 \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,02$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,606$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \overline{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,999 \geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ = 0,997$$

Podmínka je splněna.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{31,27}{1,00 \cdot 1927,65} + 1,00 \frac{22,74}{0,987 \cdot 125,67} + 0,606 \frac{5,54}{60,35} =$$

$$= 0,019 + 0,211 + 0,064 = 0,294 \leq 1,00$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{31,27}{0,866 \cdot 1927,65} + 0,999 \frac{22,74}{0,987 \cdot 125,67} + 1,01 \frac{5,54}{60,35} =$$

$$= 0,022 + 0,210 + 0,107 = 0,339 \leq 1,00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{31,27}{1927,65} + \frac{22,74}{125,67} + \frac{5,54}{60,35} = 0,019 + 0,208 + 0,106 = 0,333 \leq 1,00$$

Průřez HEB160 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace ohybového momentu a tahové normálové síly pro kombinaci NC19

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{70,77}{1927,65} + \frac{22,74}{125,67} + \frac{5,54}{60,35} = 0,042 + 0,208 + 0,106 = 0,356 \leq 1,00$$

Průřez HEB160 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC38

Prostý smyk

$$A_v = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 313,68 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 313,68 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 150,90 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 313,68 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 2 \cdot 150,90 = 301,80 \text{ kN}$$

Průřez HEB160 vyhovuje na prostý smyk.

6.9 Návrh a posudek podélného nosníku HEB160

Maximální vnitřní síly NC16 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -18,13 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 14,55 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 3,51 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC38 (s maximální tahovou silou):

$$N_{Ed,max} = 139,13 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 154,59 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 3,51 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC21:

$$V_{z,Ed,max} = 20,89 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,06 \text{ kNm}$$

Hodnota krouticího momentu je zanedbatelná.

Zatřídění průřezu HEB160

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{160-2\cdot13-2\cdot15}{8} = 13,00 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{160-2\cdot13-2\cdot15}{8} = 13,00 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{160-8-2 \cdot 15}{2 \cdot 13} = 4,69 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 67,8 \text{ mm}$$

$$i_z = 40,50 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 3,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

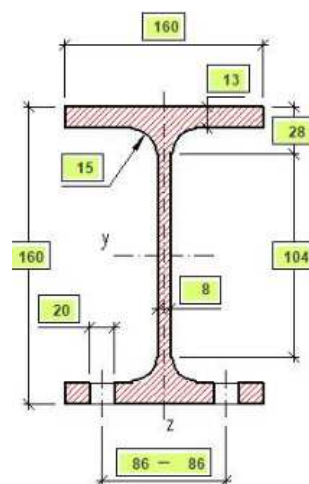
$$W_{z,pl} = 1,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = 24,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 8,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_w = 47,9 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 312 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$



Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC16

$$L_{cr,y} = 1083 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{1083}{67,8} = 15,97$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{15,97}{76,40} = 0,209 \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{b} \quad \alpha = 0,34$$

* *Válcovaný průřez* $\frac{h}{b} = \frac{160}{160} = 1,00 \leq 1,2$ a $t_f = 13 \leq 100$ mm.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,209 - 0,2) + 0,209^2] = 0,523$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,523 + \sqrt{0,523^2 - 0,209^2}} = 0,998$$

$\chi_y = 0,998 \leq 1,00$... *dochází ke vzpěru prvku*

Vzpěr ve směru osy y-y

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{1083}{40,50} = 26,74$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{26,74}{76,40} = 0,350 \text{ ... křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* *Válcovaný průřez* $\frac{h}{b} = \frac{160}{160} = 1,00 \leq 1,2$ a $t_f = 13 \leq 100$ mm.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,350 - 0,2) + 0,350^2] = 0,598$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,598 + \sqrt{0,598^2 - 0,350^2}} = 0,923$$

$\chi_z = 0,923 \leq 1,00$... *dochází ke vzpěru prvku*

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 1,083} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 47,9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 312 \cdot 10^{-9}}} = 1,830$$

$$C_1 = 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = 0$$

$$\zeta_j = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,13}{1,00} \left[\sqrt{1 + 1,830^2} \right] = 2,357$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 2,357 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 889 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 312 \cdot 10^3}}{1083} =$$

$$= 14,85 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{354 \cdot 10^3 \cdot 355}{14,85 \cdot 10^8}} = 0,291 \dots \text{ křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{160}{160} = 1,00 \leq 2,0.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,291 - 0,2) + 0,291^2] \\ = 0,552$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,552 + \sqrt{0,552^2 - 0,291^2}} = 0,979$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 5,43 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 1927,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 125,67 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 1,70 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 60,35 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\dots \text{ konzervativně } \psi = 1,00$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\overline{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = c_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq c_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,01$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,600$$

$$k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z = 0,6 + 0,350 = 0,950 \leq \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(c_{mLT} - 0,25) \frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,999$$

Podmínka je splněna.

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{18,47}{\frac{0,998 \cdot 1927,65}{1,15}} + 1,00 \frac{14,59}{\frac{0,979 \cdot 125,67}{1,15}} + 0,600 \frac{3,51}{\frac{60,35}{1,15}} = \\ & = 0,011 + 0,136 + 0,040 = 0,187 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{18,47}{\frac{0,923 \cdot 1927,65}{1,15}} + 0,950 \frac{14,59}{\frac{0,979 \cdot 125,67}{1,15}} + 1,0 \frac{3,51}{\frac{60,35}{1,15}} = \\ & = 0,012 + 0,130 + 0,067 = 0,209 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{18,47}{\frac{1927,65}{1,15}} + \frac{14,59}{\frac{125,67}{1,15}} + \frac{3,51}{\frac{60,35}{1,15}} = 0,011 + 0,134 + 0,067 = 0,212 \leq 1,00 \end{aligned}$$

Průřez HEB160 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace ohybového momentu a tahové normálové síly pro kombinaci NC38

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$= \frac{139,13}{\frac{1927,65}{1,15}} + \frac{15,55}{\frac{125,67}{1,15}} + \frac{3,51}{\frac{60,35}{1,15}} = 0,083 + 0,142 + 0,067 = 0,292 \leq 1,00$$

Průřez HEB160 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC21

Prostý smyk

$$A_v = 1,76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,76 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 313,68 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 313,68 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 20,89 \text{ kN}$$

Průřez HEB160 vyhovuje na prostý smyk.

6.10 Návrh a posudek vnitřního sloupku HEA200

Maximální vnitřní síly NC29 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -45,82 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 12,20 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 14,75 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20 (s maximální tahovou silou):

$$N_{Ed,max} = 36,30 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 12,22 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 14,75 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC20:

$$V_{z,Ed,max} = 19,29 \text{ kN}$$

$$M_{x,Ed,př} = 0,21 \text{ kNm}$$

Hodnota krouticího momentu je zanedbatelná.

Zatřídění průřezu HEA200

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{190-2\cdot 10-2\cdot 18}{6,5} = 20,62 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{190-2\cdot 10-2\cdot 18}{6,5} = 20,62 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{200-6,5-2\cdot 18}{2\cdot 10} = 7,88 \leq 10 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 8,14$$

Splněno – průřez třídy 2

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 5,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 82,8 \text{ mm}$$

$$i_z = 49,8 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 4,30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{z,pl} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$I_y = 3,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_z = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$I_w = 108 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 210 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC29

$$L_{cr,y} = 1586,47 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{1586,47}{82,8} = 19,16$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{19,16}{76,40} = 0,251 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{b} \quad \alpha = 0,34$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 10 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,34 \cdot (0,251 - 0,2) + 0,251^2] = 0,540$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,540 + \sqrt{0,540^2 - 0,251^2}} = 0,982$$

$$\chi_y = 0,982 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$L_{cr,z} = 954 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{954}{49,8} = 19,16$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{19,16}{76,40} = 0,251 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{c} \quad \alpha = 0,49$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 1,2 \text{ a } t_f = 10 \leq 100 \text{ mm.}$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,251 - 0,2) + 0,251^2] = 0,544$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,544 + \sqrt{0,544^2 - 0,251^2}} = 0,974$$

$$\chi_z = 0,974 \leq 1,00 \text{ ... dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 1,5865} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 108 \cdot 10^9 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 210 \cdot 10^{-9}}} = 2,287$$

$$C_1 = 1,13$$

$$C_2 = 0,46$$

$$C_3 = 0,53$$

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{G \cdot I_t}} = 0$$

$$\zeta_j = 0,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,13}{1,00} \left[\sqrt{1 + 2,287^2} \right] = 2,821$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 2,821 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 1340 \cdot 10^4 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 210 \cdot 10^3}}{1586,5} =$$

$$= 12,22 \cdot 10^8 \text{ Nmm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{430 \cdot 10^3 \cdot 355}{12,22 \cdot 10^8}} = 0,353 \text{ ... křivka klopení a} \quad \alpha = 0,21$$

$$* \text{ Válcovaný průřez } \frac{h}{b} = \frac{200}{190} = 1,05 \leq 2,0.$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,21 \cdot (0,353 - 0,2) + 0,353^2] \\ = 0,578$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,578 + \sqrt{0,578^2 - 0,353^2}} = 0,966$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 5,83 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 2069,65 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 4,30 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 152,65 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y = 2,04 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3 = 72,42 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

... konzervativně $\psi = 1,00$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$C_{mLT} = 0,6 + 0,4\psi = 1,0 \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,04$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,00 \leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 1,04$$

Podmínka je splněna.

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,600$$

$$k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z = 0,6 + 0,251 = 0,851 \leq \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,940$$

Podmínka je splněna.

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{45,82}{\frac{0,982 \cdot 2069,65}{1,15}} + 1,00 \frac{12,20}{\frac{0,966 \cdot 152,65}{1,15}} + 0,6 \frac{14,75}{\frac{72,42}{1,15}} = \\ & = 0,026 + 0,095 + 0,141 = 0,262 \leq 1,00 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{45,82}{\frac{0,974 \cdot 2069,65}{1,15}} + 0,851 \frac{12,22}{\frac{0,966 \cdot 152,65}{1,15}} + 1,0 \frac{14,75}{\frac{72,42}{1,15}} = \end{aligned}$$

$$= 0,026 + 0,081 + 0,234 = 0,341 \leq 1,00$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1} M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} M_{z,Rd}} = \frac{45,82}{\frac{2069,65}{1,15}} + \frac{12,22}{\frac{152,65}{1,15}} + \frac{14,75}{\frac{72,42}{1,15}} = 0,025 + 0,092 + 0,234 = 0,351 \leq 1,00$$

Průřez HEA200 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace ohybového momentu a tahové normálové síly pro kombinaci NC20

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1} M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} M_{z,Rd}} = \frac{36,30}{\frac{2069,65}{1,15}} + \frac{12,22}{\frac{152,65}{1,15}} + \frac{14,75}{\frac{72,42}{1,15}} = 0,020 + 0,092 + 0,234 = 0,346 \leq 1,00$$

Průřez HEA200 vyhovuje na kombinaci tahu a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC20

Prostý smyk

$$A_v = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{1,81 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 322,59 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 322,59 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 19,29 \text{ kN}$$

Průřez HEA200 vyhovuje na prostý smyk.

6.11 Návrh a posudek podélného nosníku ½ IPE200 pod řetězem

Maximální vnitřní síly NC35 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -9,06 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,př} = 1,51 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,př} = 1,57 \text{ kNm}$$

Maximální vnitřní síly NC21:

$$V_{z,Ed,max} = 4,14 \text{ kN}$$

Zatřídění průřezu ½ IPE200

Stojina - ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{10-2\cdot 9}{6} = 13,67 \leq 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 58,58$$

Splněno – průřez třídy 1

Stojina - tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{10-2\cdot 9}{6} = 13,67 \leq 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Splněno – průřez třídy 1

Pásnice – tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{100-6}{2\cdot 9} = 5,22 \leq 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Splněno – průřez třídy 1

Průřezové charakteristiky nosníku

$$A = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = 29 \text{ mm}$$

$$i_z = 23 \text{ mm}$$

$$W_{y,pl} = 2,667 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$I_y = 1,162 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 7,097 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_w = 684,70 \cdot 10^4 \text{ mm}^6$$

$$I_t = 24,24 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$$

Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové normálové síly pro kombinaci NC29

$$L_{cr,y} = 2410,5 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{2410,5}{29} = 83,12$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{83,12}{76,40} = 1,088 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* *T - průřez.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (1,088 - 0,2) + 1,088^2] = 1,309$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,309 + \sqrt{1,309^2 - 1,088^2}} = 0,491$$

$$\chi_y = 0,491 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y

$$L_{cr,z} = 2410,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{2410,5}{23} = 104,80$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{104,80}{76,40} = 1,372 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* *T – průřez.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (1,372 - 0,2) + 1,372^2] = 1,728$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,728 + \sqrt{1,728^2 - 1,372^2}} = 0,360$$

$$\chi_z = 0,360 \leq 1,00 \dots \text{dochází ke vzpěru prvku}$$

Prostorový vzpěr

Polární moment setrvačnosti průřezu (a je vzdálenost těžiště a středu smyku):

$$I_p = I_y + I_z + A \cdot a^2 = 1,162 \cdot 10^6 + 7,097 \cdot 10^5 + 1,36 \cdot 10^3 \cdot 19^2 \\ = 23,63 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{I_p}{\frac{I_w}{L_{cr,w}} + \frac{I_t}{25}}} = \sqrt{\frac{23,63 \cdot 10^5}{0 + \frac{24,24 \cdot 10^3}{25}}} = 49,37$$

$$i_p = \sqrt{\frac{I_p}{A}} = \sqrt{\frac{23,63 \cdot 10^5}{1,36 \cdot 10^3}} = 41,68 \text{ mm}$$

$$\alpha = \left(\frac{a_z}{i_p}\right)^2 = \left(\frac{19}{41,68}\right)^2 = 0,208$$

$$\lambda_z = \lambda_1 = 104,80 > \lambda_w = \lambda_2 = 49,37$$

$$\lambda_{zw} = \sqrt{\lambda_1^2 + \alpha \cdot \lambda_2^2} = \sqrt{104,80^2 + 0,208 \cdot 49,37^2} = 107,19 \geq \lambda_z$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda_{zw}} = \frac{\lambda_{yw}}{\lambda_1} = \frac{107,19}{76,40} = 1,403 \dots \text{křivka vzpěrnosti c} \quad \alpha = 0,49$$

* *T – průřez.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda_{zw}} - 0,2) + \overline{\lambda_{zw}}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,49 \cdot (1,403 - 0,2) + 1,403^2] \\ = 1,779$$

$$\chi_{zw} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda_{zw}}^2}} = \frac{1}{1,779 + \sqrt{1,779^2 - 1,403^2}} = 0,348$$

$$\chi_{zw} = 0,348 \leq 1,00 \dots \text{dochází ke vzpěru prvku}$$

Výpočet klopení

$$k_z = k_y = k_w = 1,00$$

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w \cdot L_{cr}} \sqrt{\frac{E \cdot I_w}{G \cdot I_t}} = \frac{\pi}{1,00 \cdot 2,4105} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9 \cdot 684,70 \cdot 10^4 \cdot 10^{-18}}{81 \cdot 10^9 \cdot 24,24 \cdot 10^{-8}}} = 0,011$$

$$C_1 = 1,00$$

$$C_2 = 1,00$$

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2} \right] = \frac{1,00}{1,00} \left[\sqrt{1 + 0,011^2} \right] = 1,001$$

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t}}{L_{cr}} = 1,001 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^3 \cdot 7,097 \cdot 10^5 \cdot 81 \cdot 10^3 \cdot 24,24 \cdot 10^3}}{2410,5} \\ = 22,32 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2,667 \cdot 10^4 \cdot 355}{22,32 \cdot 10^6}} = 0,651 \dots \text{křivka klopení } d \quad \alpha = 0,76$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\overline{\lambda}_{LT} - 0,2) + \overline{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 [1 + 0,76 \cdot (0,651 - 0,2) + 0,651^2] \\ = 0,883$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,883 + \sqrt{0,883^2 - 0,651^2}} = 0,676$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 482,8 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y = 2,667 \cdot 10^{-5} \cdot 355 \cdot 10^3 = 9,47 \text{ kNm}$$

Posudek kombinace tlakové normálové síly a ohybového momentu

$$\alpha_s = -0,694$$

$$\psi = 0,858$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8\alpha_s = \mathbf{0,655} \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4\psi = 0,257 \geq \mathbf{0,4}$$

$$C_{mLT} = 0,1 - 0,8\alpha_s = \mathbf{0,655} \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\overline{\lambda}_y - 0,2) \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = \mathbf{0,714} \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) = 0,714$$

Podmínka je splněna.

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,977 \leq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right]$$

$$= 0,984$$

Podmínka není splněna.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{9,06}{\frac{0,491 \cdot 482,8}{1,15}} + 0,714 \frac{1,51}{\frac{0,676 \cdot 9,47}{1,15}} + \frac{1,57}{\frac{9,47}{1,15}} =$$

$$= 0,044 + 0,194 + 0,191 = 0,429 \leq 1,00$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_{zw} \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{9,06}{\frac{0,348 \cdot 482,8}{1,15}} + 0,977 \frac{1,51}{\frac{0,676 \cdot 9,47}{1,15}} + \frac{1,57}{\frac{9,47}{1,15}} =$$

$$= 0,062 + 0,265 + 0,191 = 0,518 \leq 1,00$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{9,06}{\frac{482,8}{1,15}} + \frac{1,51}{\frac{9,47}{1,15}} + \frac{1,57}{\frac{9,47}{1,15}} = 0,022 + 0,183 + 0,191 = 0,396 \leq 1,00$$

Průřez T100 vyhovuje na kombinaci tlaku a ohybu.

Posudek kombinace smykové síly pro kombinaci NC21

Prostý smyk

$$A_v = 5,6 \cdot 91,5 = 5,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{5,12 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 1,15} 10^{-3} = 91,25 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = 91,25 \text{ kN} \geq V_{Ed,max} = 4,14 \text{ kN}$$

Průřez T100 vyhovuje na prostý smyk.

6.12 Návrh a posudek skloněné výztuhy SHS 88,9x4

Výztuha je připojena ke sloupům rámově pomocí svaření. Prut je namáhán pouze osovými silami a posouzen na maximální tahové a maximální tlakové namáhání.

Maximální vnitřní síly NC20 (s maximální tlakovou silou):

$$N_{Ed,max} = -108,28 \text{ kN}$$

Maximální vnitřní síly NC19 (s maximální tahovou silou):

$$N_{Ed,max} = 75,73 \text{ kN}$$

Zatřídění průřezu SHS 88,9x4 – ohyb a tlak

$$\frac{d}{t} = \frac{88,9}{4} = 22,23 \leq 50 \cdot \varepsilon^2 = 50 \cdot \left(\sqrt{\frac{235}{355}} \right)^2 = 33,09 \quad \text{Splněno - třída průřezu 1}$$

Průřezové charakteristiky výztuhy

$$A = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$i_y = i_z = 30 \text{ mm}$$

Posudek tlakové normálové síly pro kombinaci NC20

$$L_{cr,y} = 1854,211 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z a y-y

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{1854,211}{30} = 61,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\overline{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{61,81}{76,40} = 0,809 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } c \quad \alpha = 0,49$$

* Dutý průřez tvarovaný za studena.

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\overline{\lambda}_y - 0,2) + \overline{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,49 \cdot (0,809 - 0,2) + 0,809^2] = 0,976$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \overline{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,976 + \sqrt{0,976^2 - 0,809^2}} = 0,657$$

$$\chi_y = 0,428 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

$$N_{Rd} = A \cdot f_y = 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot 355 \cdot 10^3 = 379,85 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,657 \cdot 379,85}{1,15} = 217,00 \text{ kN} \geq N_{Ed,max} = 108,28 \text{ kN}$$

Průřez SHS 88,9x4 vyhovuje na namáhání tlakem s vlivem vzpěru.

Posudek tahové normálové síly pro kombinaci NC19

$$N_{pl,Rd} = \frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{379,85}{1,15} = 330,30 \text{ kN} \geq N_{Ed,max} = 75,73 \text{ kN}$$

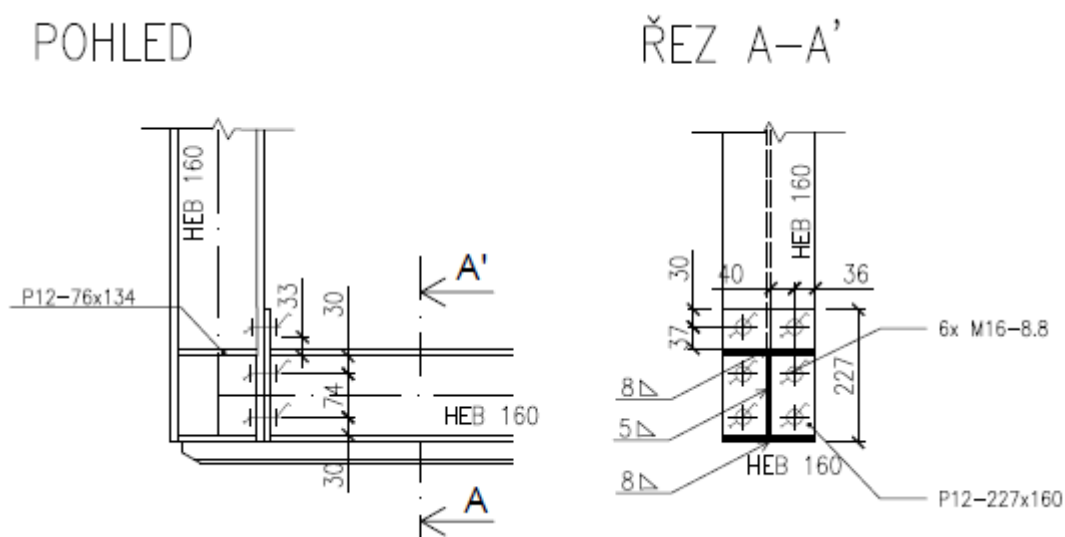
Průřez SHS 88,9x4 vyhovuje na tah.

6.13 Návrh a posudek styčníků konstrukce vyhrnovacího řetězu

V této kapitole je proveden posudek vybraných styčníků konstrukce pro vyhrnovací řetěz umístěné pod hlavní ocelovou konstrukcí mostového shrnovače.

6.13.1 Přípoj podélného nosníku HEB160 na sloup HEB160

V souladu s numerickým modelem v software Scia Engineer a rámovým připojením podélného nosníku HEB 160 na sloup konstrukce profilu HEB 160, je daný styčník navržen s čelními deskami a posouzen s použitím metody komponent.



Obr. 100: Schéma přípoje pomocí čelní desky

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 130,19 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 20,89 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 14,55 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 3,51 \text{ kNm}$$

Svar tažené příčle a čelní desky

$$a \geq t_{fb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 13 = 7,15 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 8,00 \text{ mm}$

Svar stojiny a čelní desky

$$a \geq t_{wb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 8 = 4,4 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 5,00 \text{ mm}$

Svar tlačené pásnice a čelní desky

Návrh účinné tloušťky $a = 8,00 \text{ mm}$

- *Konec pásnice není upraven pro přenos tlakové síly.*

Výpočet únosnosti první řady šroubů

Vyztužená pásnice v příčném ohybu

$$m_{c1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2 \cdot r_c - t_{wc}}{2} = \frac{88 - 0,8 \cdot 2 \cdot 15 - 8}{2} = 28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1c} = 2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 28,00 = 175,93 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2c} = 4 \cdot m_{c1} + 1,25 \cdot e_c = 4 \cdot 28,00 + 1,25 \cdot 36 = 157,00 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3c} = \pi \cdot m_{c1} + 2 \cdot e_1 = \pi \cdot 28,00 + 2 \cdot 30 = 147,96 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4c} = 2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + e_1 = 2 \cdot 28 + 0,625 \cdot 36 + 30 = 108,50 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1c} = L_{eff,2c} = 108,50 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{y,c}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 108,50 \cdot 13^2 \cdot 355}{1,15} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 1,42 \cdot 10^6}{28,00} \cdot 10^{-3} = 202,86 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{y,c}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 108,50 \cdot 13^2 \cdot 355}{1,15} = 1,42 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,c} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(30; 1,25 \cdot 28,00) = 30,00 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,c} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 1,42 \cdot 10^6 + 30,00 \cdot 173,90 \cdot 10^3}{28,00 + 30,00} \cdot 10^{-3} \\ = 138,91 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 173,90 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{202,86; 138,91; 173,90\} = 138,91 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Čelní deska v příčném ohybu

$$m_{px} = (d_1 - e_1 - 0,8\sqrt{2}a_{if}) = (67 - 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 7) = 29,08 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{px} = 2 \cdot \pi \cdot 29,08 = 182,72 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = \pi \cdot m_{px} + w = \pi \cdot 29,08 + 88 = 179,36 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{px} + 2e_p = \pi \cdot 29,08 + 2 \cdot 36 = 163,36 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 4 \cdot m_{px} + 1,25 \cdot e_x = 4 \cdot 29,08 + 1,25 \cdot 36 = 161,32 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = e_p + 2m_{px} + 0,625e_x = 50 + 2 \cdot 29,08 + 0,625 \cdot 36 = 130,60 \text{ mm}$$

$$L_{eff,6p} = 0,5b_{ep} = 0,5 \cdot 160 = 80 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1b} = L_{eff,2b} = 80 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 80 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,58 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{px}} = \frac{4 \cdot 1,58 \cdot 10^6}{29,08} \cdot 10^{-3} = 217,33 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 80 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,58 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,cp} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(30; 1,25 \cdot 29,08) = 30,00 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,ep} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 1,58 \cdot 10^6 + 30,00 \cdot 173,90 \cdot 10^3}{29,08 + 30,00} \cdot 10^{-3} = 141,79 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 173,90 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{217,33; 141,79; 173,90\} = 141,91 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna sloupu v příčném tahu

Převodní součinitel pro jednostranný styčník:

$$\beta \approx 1,00$$

Smyková plocha sloupu:

$$A_v = 1,76 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

Účinná výška stěny sloupu v tahu:

$$b_{eff,1wc} = L_{eff,c} = 108,50 \text{ mm}$$

Redukční součinitel interakce se smykem:

$$\omega_{r2,c} = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{108,50 \cdot 8}{1760} \right)^2}} = 0,872$$

Návrhová únosnost stěny sloupu v příčném tahu

$$\begin{aligned} F_{T,wc,Rd,row1} &= \frac{\omega_{r2,c} \cdot b_{eff,1wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,872 \cdot 155,50 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} \\ &= 334,86 \text{ kN} \end{aligned}$$

Výpočet únosnosti druhé řady šroubů

Vyztužená pásnice v příčném ohybu

$$m_{c1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2 \cdot r_c - t_{wc}}{2} = \frac{88 - 0,8 \cdot 2 \cdot 15 - 8}{2} = 28 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1c} = 2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 28,00 = 175,93 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2c} = 4 \cdot m_{c1} + 1,25 \cdot e_c = 4 \cdot 28,00 + 1,25 \cdot 36 = 157,00 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3c} = \pi \cdot m_{c1} + 0,5p = \pi \cdot 28,00 + 0,5 \cdot 74 = 124,96 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4c} = 2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + 0,5p = 2 \cdot 28 + 0,625 \cdot 36 + 0,5 \cdot 74 = 115,50 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5c} = \pi \cdot m_{c1} + 0,5d_2 = \pi \cdot 28,00 + 0,5 \cdot 80 = 127,96 \text{ mm}$$

$$L_{eff,6c} = 0,5d_2 + 0,5p = 0,5 \cdot 80 + 0,5 \cdot 74 = 77 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1c} = L_{eff,2c} = 115,50 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{y,c}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 77 \cdot 13^2 \cdot 355}{1,15} = 1,00 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 1,00 \cdot 10^6}{28,00} \cdot 10^{-3} = 142,86 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{y,c}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 77 \cdot 13^2 \cdot 355}{1,15} = 1,00 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,c} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(36; 1,25 \cdot 28,00) = 35,00 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,c} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 1,00 \cdot 10^6 + 35,00 \cdot 173,90 \cdot 10^3}{28,00 + 35,00} \cdot 10^{-3} \\ = 128,36 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 173,90 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{142,86; 128,36; 173,90\} = 128,36 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Čelní deska v příčném ohybu

$$m_{p1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_w - t_{wb}}{2} = \frac{88 - 0,8 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4 - 8}{2} = 35,47 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 35,47 = 222,86 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = \pi \cdot m_{p1} + 0,5p = \pi \cdot 35,47 + 0,5 \cdot 74 = 148,43 \text{ mm}$$

$$\text{konzervativně } \alpha = 5,00$$

$$L_{eff,3p} = \alpha \cdot m_{p1} = \alpha \cdot 35,47 = 177,35 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1b} = L_{eff,2b} = 148,43 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 148,43 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,93 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{p1}} = \frac{4 \cdot 2,93 \cdot 10^6}{35,47} \cdot 10^{-3} = 330,42 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 148,43 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,93 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,cp} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(36; 1,25 \cdot 35,47) = 36,00 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,ep} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 2,93 \cdot 10^6 + 36,00 \cdot 173,90 \cdot 10^3}{35,47 + 36,00} \cdot 10^{-3} \\ = 169,59 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 173,90 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{330,42; 169,59; 173,90\} = 169,59 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stěna sloupu v příčném tahu

Převodní součinitel pro jednostranný styčnick:

$$\beta \approx 1,00$$

Smyková plocha sloupu:

$$A_v = 1,76 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

Účinná výška stěny sloupu v tahu:

$$b_{eff,1wc} = L_{eff,c} = 77 \text{ mm}$$

Redukční součinitel interakce se smykem:

$$\omega_{r2,c} = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{77 \cdot 8}{1760} \right)^2}} = 0,929$$

Návrhová únosnost stěny sloupu v příčném tahu

$$\begin{aligned} F_{T,wc,Rd,row1} &= \frac{\omega_{r2,c} \cdot b_{eff,1wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,929 \cdot 77,00 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} \\ &= 176,66 \text{ kN} \end{aligned}$$

Stojina nosníku v tahu

Účinná výška stojiny nosníku v tahu:

$$b_{eff,1wb} = L_{eff,b} = 148,43 \text{ mm}$$

Návrhová únosnost stojiny nosníku v tahu:

$$F_{T,wc,Rd,row1} = \frac{b_{eff,1wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{148,43 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 366,56 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 1.řady šroubů:

$$F_{T,Rd} = \min\{128,36; 169,59; 176,66; 366,56\} = 128,36 \text{ kN}$$

Únosnost v tlačené oblasti

Stěna sloupu v příčném tlaku

$$\begin{aligned} b_{eff,c,wc} &= t_{fb} + 2\sqrt{2}a_{ef} + 5(t_{fc} + r_c) + \sqrt{2}t_p \\ &= 13 + 2\sqrt{2} \cdot 7 + 5(13 + 15) + \sqrt{2} \cdot 16,00 = 195,43 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,c,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{195,43 \cdot 8}{1760} \right)^2}} = 0,703$$

Redukční součinitel stanovený v souladu s ČSN EN 1993-1-8:

$$\text{konzervativně } k_{wc} = 0,7$$

Desková štíhlost stěny sloupu:

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c) = 160 - 2(13 + 15) = 104 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \cdot d_{wc} \cdot f_{y,wc}}{E \cdot t_{wc}^2}} = 0,932 \sqrt{\frac{195,43 \cdot 104 \cdot 355}{210000 \cdot 8^2}} = 0,683 \leq 0,72$$

$$\rho = 1,00$$

Návrhová únosnost nevyztužené stěny sloupu v příčném tlaku

$$\begin{aligned} F_{c,wc,Rd} &= \frac{\omega_c \cdot k_{wc} \cdot \rho_c \cdot b_{eff,c,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,703 \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 195,43 \cdot 8 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} \\ &= 329,49 \text{ kN} \end{aligned}$$

Návrhová únosnost neovlivňuje momentovou únosnost styčnicku, je zde navržena výztuha konstrukčně se stejnou tloušťkou jako je pásnice nosníku a stejnou kvalitou oceli.

Pásnice a stojina nosníku v tlaku

Návrhová momentová únosnost průřezu nosníku:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{354 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 109,28 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Návrhová únosnost pásnice a stojiny nosníku v tlaku:

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{109,28 \cdot 10^6}{160 - 13} \cdot 10^{-3} = 743,40 \text{ kN}$$

Panel stěny sloupu ve smyku

Ověření štíhlosti stěny sloupu:

$$\frac{d_c}{t_{wc}} = \frac{104}{8} = 13,5 \leq 69\varepsilon_c = 69\sqrt{\frac{235}{355}} = 56,14 \quad \textbf{Panel stěny neboulí.}$$

Únosnost nevyztuženého panelu stěny ve smyku:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{vc} \cdot f_{y,wc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 1760 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 282,31 \text{ kN} \geq F_{T,Rd} = 144,55 \text{ kN}$$

Nevyztužený panel stěny ve smyku nelimituje momentovou únosnost styčnicku.

Momentová únosnost styčnicku

Vzdálenost řady šroubů od středu otáčení spoje:

$$h_1 = 110,5 \text{ mm}$$

$$h_2 = 160,5 \text{ mm}$$

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{j,Rd} = \sum F_{T,Rd} \cdot h = 128,36 \cdot 0,1105 + 141,92 \cdot 0,1605 = 36,96 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 36,96 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed,max} = 14,55 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na momentovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Pro přenos posouvající síly se použije poslední řada šroubu.

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \frac{\frac{f_{ub}}{f_{up}}}{\frac{p_1}{3d_0} - 0,25}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = \min \left\{ \frac{\frac{800}{510}}{\frac{74}{3 \cdot 18} - 0,25}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = \min \left\{ \frac{1,57}{1,12}, \frac{1,0}{1,0} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0}}{1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = \min \left\{ \frac{2,8 \cdot \frac{30}{18}}{1,4 \frac{88}{18} - 1,7}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = \min \left\{ \frac{4,66}{5,14}, \frac{2,5}{2,5} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 2 \cdot 48,31 = 96,62 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 20,89 \text{ kN}$$

Spoj jistě vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

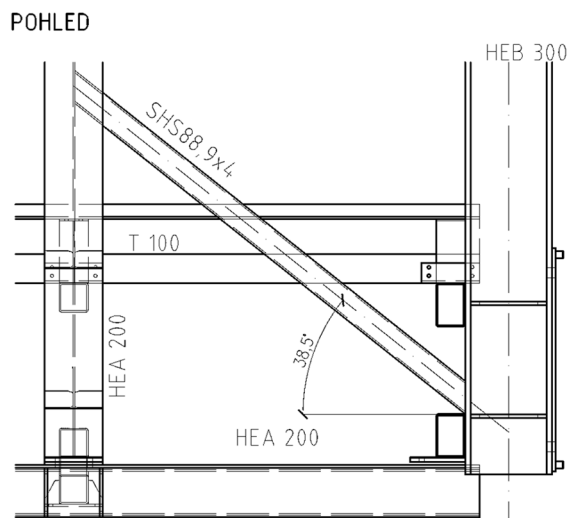
Kombinace stříhu a tahu

$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Ed}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{20,89}{6 \cdot 48,31} + \frac{130,19}{1,4 \cdot 128,36 \cdot 3} = 0,314 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci stříhu a tahu.

6.13.2 Svařovaný přípoj vzpěry CHS 88,9x4 na sloup HEB300



Obr. 101: Schéma svařovaného přípoje CHS 88,9x4 na pásnici sloupu HEB300

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 108,25 \text{ kN}$$

Plastifikace stěny pásu

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin \theta_1 \cdot \gamma_{M5}} = \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,011 \cdot 0,3}{\sin(51,5^\circ) \cdot 1,00} \cdot 10^{-3} = 1496,92 \text{ kN}$$

Porušení mezipásového prutu

$$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \frac{f_{y0}}{f_{y1}} = 11 + 2 \cdot 27 + 7 \cdot 19 \cdot 1,0 = 198 \text{ mm}$$

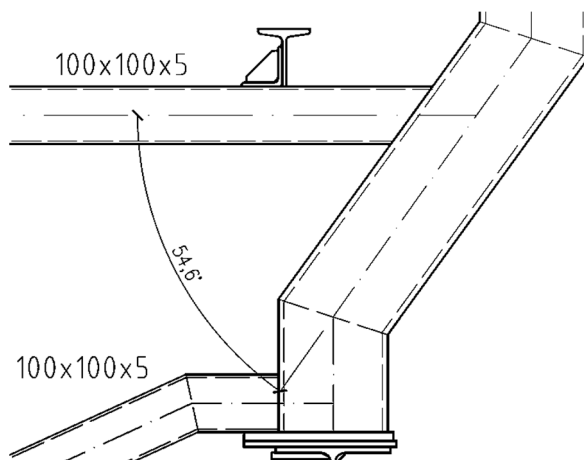
$$p_{eff} = 198 \text{ mm} \leq b_1 + h_1 - 2t_1 = 88,9 + 88,9 - 2 \cdot 4 = \mathbf{169,8 \text{ mm}}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot p_{eff}}{4 \cdot \gamma_{M5}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,004 \cdot 0,1698}{4 \cdot 1,0} \cdot 10^{-3} = 1893,72 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = \min\{1496,92; 1893,72\} = 1496,92 \text{ kN} \geq N_{Ed,max} = 108,25 \text{ kN}$$

Svarový přípoj profilu CHS na HEB 300 vyhovuje.

6.13.3 Svařovaný přípoj prvku SHS 100x100x5 a HEA200



Obr. 102: Schéma svařovaného přípoje SHS 100x100x5 na pásnici sloupu HA200

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 2,26 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 4,80 \text{ kNm}$$

Plastifikace stěny pásu

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin \theta_1}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,0065 \cdot 0,2}{\sin(54,6^\circ)}}{1,00} \cdot 10^{-3} = 566,168 \text{ kN}$$

Porušení mezipásového prutu

$$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \frac{f_{y0}}{f_{y1}} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 10 \cdot 1,0 = 112,5 \text{ mm}$$

$$p_{eff} = \mathbf{112,5 \text{ mm}} \leq b_1 + h_1 - 2t_1 = 100 + 100 - 2 \cdot 5 = 190 \text{ mm}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{2 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot p_{eff}}{\gamma_{M5}} = \frac{2 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,005 \cdot 0,1125}{1,0} \cdot 10^{-3} = 399,375 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = \min\{566,168; 399,375\} = 399,38 \text{ kN} \geq N_{Ed,max} = 2,26 \text{ kN}$$

Svarový přípoj profilu SHS na HEA 200 vyhovuje.

Návrhové momenty únosnosti

Plastifikace stěny pásu

$$b_w = \frac{h_1}{\sin\theta_1} + 5(t_f + r) = \frac{100}{\sin(54,6^\circ)} + 5(10 + 18) = 262,68 \text{ mm}$$

$$b_w = \mathbf{262,68 \text{ mm}} \leq 2t_1 + 10(t_f + r) = 2 \cdot 5 + 10(10 + 18) = 290 \text{ mm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w \cdot h_1}{\gamma_{M5}} = \frac{0,5 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,0065 \cdot 0,26268 \cdot 0,100}{1,00} \cdot 10^{-3} \\ = 30,306 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$b_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \frac{f_{y0}}{f_{y1}} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 10 \cdot 1,0 = 112,50 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = \mathbf{112,50 \text{ mm}} \leq b_1 = 160 \text{ mm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \cdot t_1 \cdot b_{eff} \cdot (h_1 - t_1)}{\gamma_{M5}} = \\ = \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,005 \cdot 0,1125 \cdot (0,100 - 0,005)}{1,00} \cdot 10^{-3} = 19,57 \text{ kNm}$$

$$M_{ip,Rd} = \min\{30,306 ; 19,57\} = 19,570 \text{ kN} \geq M_{y,Ed,max} = 4,80 \text{ kN}$$

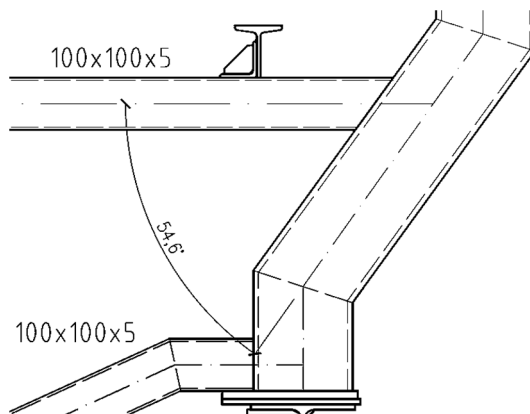
Posudek prutu namáhaného kombinací osově síly a ohybu

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} + \frac{M_{ip,y,Ed}}{M_{ip,Rd}} \leq 1,00$$

$$\frac{2,26}{399,38} + \frac{4,80}{19,57} = 0,251 \leq 1,00$$

Svarový přípoj profilu SHS na pásnici profilu HEA200 vyhovuje.

6.13.4 Svařovaný přípoj rovného prvku SHS 100x100x5 a HEA200



Obr. 103: Schéma svařovaného přípoje SHS 100x100x5 na pásnici sloupu HA200

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 16,99 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 2,55 \text{ kNm}$$

Plastifikace stěny pásu

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin \theta_1}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,0065 \cdot 0,2}{\sin(90^\circ)}}{1,00} \cdot 10^{-3} = 461,50 \text{ kN}$$

Porušení mezipásového prutu

$$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \frac{f_{y0}}{f_{y1}} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 10 \cdot 1,0 = 112,5 \text{ mm}$$

$$p_{eff} = 112,5 \text{ mm} \leq b_1 + h_1 - 2t_1 = 100 + 100 - 2 \cdot 5 = 190 \text{ mm}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{2 \cdot f_{y1} \cdot t_1 \cdot p_{eff}}{\gamma_{M5}} = \frac{2 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,005 \cdot 0,1125}{1,0} \cdot 10^{-3} = 399,375 \text{ kN}$$

$$N_{1,Rd} = \min\{461,50; 399,375\} = 399,38 \text{ kN} \geq N_{Ed,max} = 16,99 \text{ kN}$$

Svarový přípoj profilu SHS na HEA 200 vyhovuje.

Návrhové momenty únosnosti

Plastifikace stěny pásu

$$b_w = \frac{h_1}{\sin\theta_1} + 5(t_f + r) = \frac{100}{\sin(90^\circ)} + 5(10 + 18) = 240 \text{ mm}$$

$$b_w = \mathbf{240,00 \text{ mm}} \leq 2t_1 + 10(t_f + r) = 2 \cdot 5 + 10(10 + 18) = 290 \text{ mm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w \cdot h_1}{\gamma_{M5}} = \frac{0,5 \cdot 355 \cdot 10^6 \cdot 0,0065 \cdot 0,240 \cdot 0,100}{1,00} \cdot 10^{-3} \\ = 27,69 \text{ kNm}$$

Porušení mezipásového prutu

$$b_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \frac{f_{y0}}{f_{y1}} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 10 \cdot 1,0 = 112,50 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = \mathbf{112,50 \text{ mm}} \leq b_1 = 160 \text{ mm}$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \cdot t_1 \cdot b_{eff} \cdot (h_1 - t_1)}{\gamma_{M5}} = \\ = \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,005 \cdot 0,1125 \cdot (0,100 - 0,005)}{1,00} \cdot 10^{-3} = 19,57 \text{ kNm}$$

$$M_{ip,Rd} = \min\{27,69 ; 19,57\} = 19,57 \text{ kN} \geq M_{y,Ed,max} = 2,55 \text{ kN}$$

Posudek prutu namáhaného kombinací osově síly a ohybu

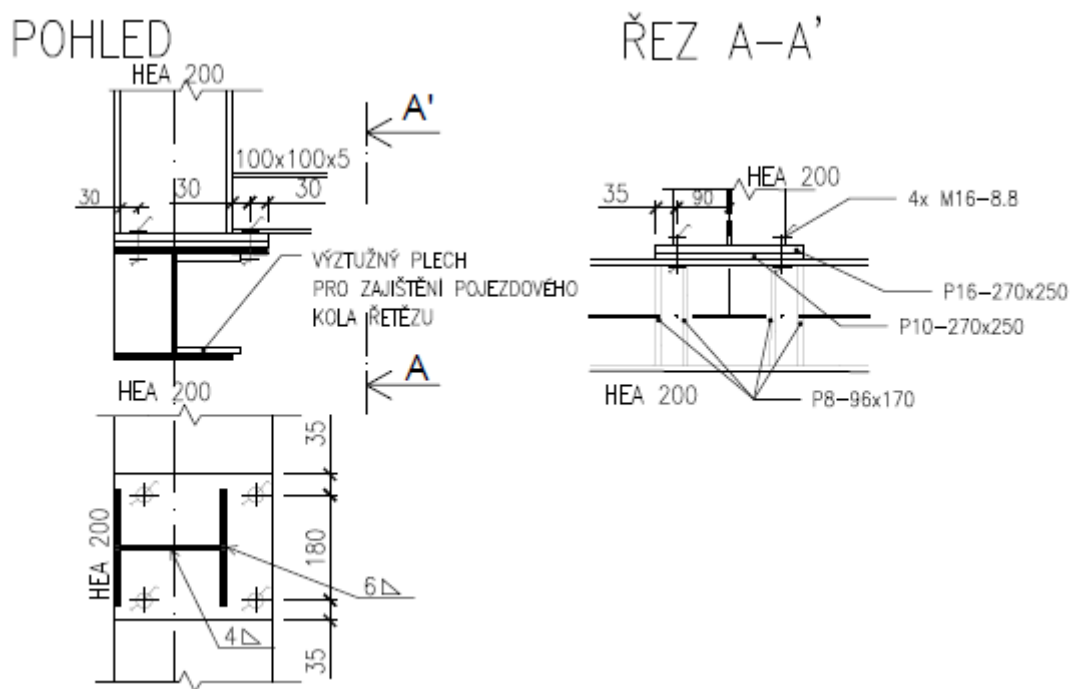
$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} + \frac{M_{ip,y,Ed}}{M_{ip,Rd}} \leq 1,00$$

$$\frac{16,99}{399,38} + \frac{2,55}{19,57} = 0,173 \leq 1,00$$

Svarový přípoj profilu SHS na pásnici profilu HEA200 vyhovuje.

6.13.5 Přípoj sloupu HEA200 a vodorovného nosníku HEA200

Přípoj je posouzen s ohledem na páčení čelní desky sloupu HEA200 tloušťky 16 mm, která je slabým místem styčnicku. Pásnice podélného nosníku je zesílena v místě styčnicku plechem tloušťky 10 mm.



Obr. 104: Schéma svařovaného přípoje HEA200 na pásnici sloupu HEA200

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 36,30 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 19,29 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 12,22 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 14,75 \text{ kNm}$$

Svar tažené příčle a čelní desky

$$a \geq t_{fb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 10 = 5,5 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 6,00 \text{ mm}$

Svar stojiny a čelní desky

$$a \geq t_{wb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 6,5 = 3,5 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 4,00 \text{ mm}$

Svar tlačené pásnice a čelní desky

Návrh účinné tloušťky $a = 6,00 \text{ mm}$

- Konec pásnice není upraven pro přenos tlakové síly.

Výpočet únosnosti první řady šroubů

Čelní deska v příčném ohybu

$$m_{px} = (d_1 - e_1 - 0,8\sqrt{2}a_{if}) = (60 - 30 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 5) = 24,34 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{px} = 2 \cdot \pi \cdot 24,34 = 152,93 \text{ mm}$$

$$L_{eff,2p} = \pi \cdot m_{px} + w = \pi \cdot 24,34 + 180 = 256,47 \text{ mm}$$

$$L_{eff,3p} = \pi \cdot m_{px} + 2e_p = \pi \cdot 24,34 + 2 \cdot 35 = 146,47 \text{ mm}$$

$$L_{eff,4p} = 4 \cdot m_{px} + 1,25 \cdot e_x = 4 \cdot 24,34 + 1,25 \cdot 30 = 134,86 \text{ mm}$$

$$L_{eff,5p} = e_p + 2m_{px} + 0,625e_x = 65 + 2 \cdot 24,34 + 0,625 \cdot 30 = 132,43 \text{ mm}$$

$$L_{eff,6p} = 0,5b_{ep} = 0,5 \cdot 250 = 125 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1b} = L_{eff,2b} = 125 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} = 86,95 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 125 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,47 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{px}} = \frac{4 \cdot 2,47 \cdot 10^6}{24,34} \cdot 10^{-3} = 405,92 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 125 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 2,46 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,cp} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(30; 1,25 \cdot 24,35) = 30,00 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,ep} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{p1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 2,46 \cdot 10^6 + 30,00 \cdot 173,90 \cdot 10^3}{24,35 + 30,00} \cdot 10^{-3} \\ = 186,51 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 173,90 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{405,92; 186,51; 173,90\} = 173,90 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 3.

Stojina nosníku v tahu

Účinná výška stojiny nosníku v tahu:

$$b_{eff,1wb} = L_{eff,b} = 125 \text{ mm}$$

Návrhová únosnost stojiny nosníku v tahu:

$$F_{T,wc,Rd,row1} = \frac{b_{eff,1wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{125 \cdot 6,5 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 250,82 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 1. řady šroubů:

$$F_{T,Rd} = \min\{173,90; 250,82\} = 173,90 \text{ kN}$$

Momentová únosnost styčnicku

Vzdálenost řady šroubů od středu otáčení spoje:

$$h_1 = 205 \text{ mm}$$

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{j,Rd} = F_{T,Rd} \cdot h = 173,90 \cdot 0,205 = 35,65 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 35,65 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed,max} = 12,22 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na momentovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Pro přenos posouvající síly se použije poslední řada šroubu.

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 157 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 48,31 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{250}{3 \cdot 18} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 4,38 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{30}{18} \\ 1,4 \frac{180}{18} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 4,67 \\ 12,30 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 16 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 251,08 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{251,08; 48,31\} = 48,31 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 2 \cdot 48,31 = 96,62 \text{ kN} \geq V_{z,Ed,max} = 19,29 \text{ kN}$$

Spoj jistě vyhovuje pro namáhání smykovou silou.

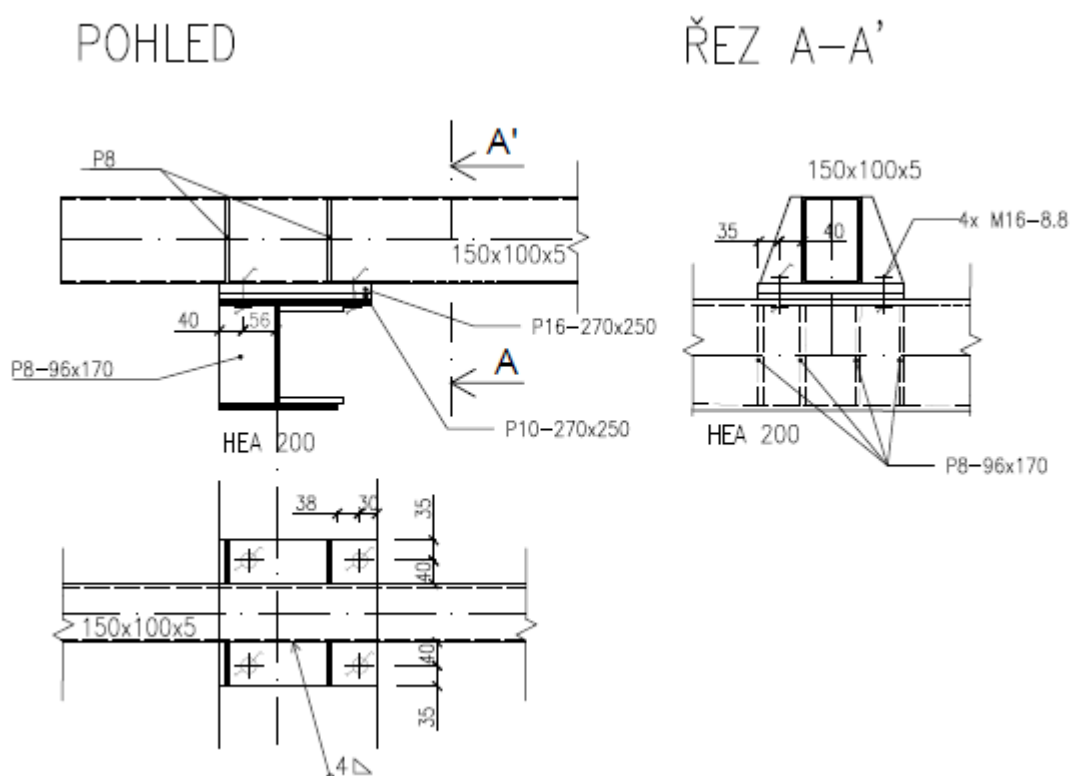
Kombinace střihu a tahu

$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Ed}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Ed}} \leq 1,0$$

$$\frac{39,29}{4 \cdot 48,31} + \frac{36,30}{1,4 \cdot 173,90 \cdot 4} = 0,241 \leq 1,0$$

Styčnick vyhovuje na kombinaci střihu a tahu.

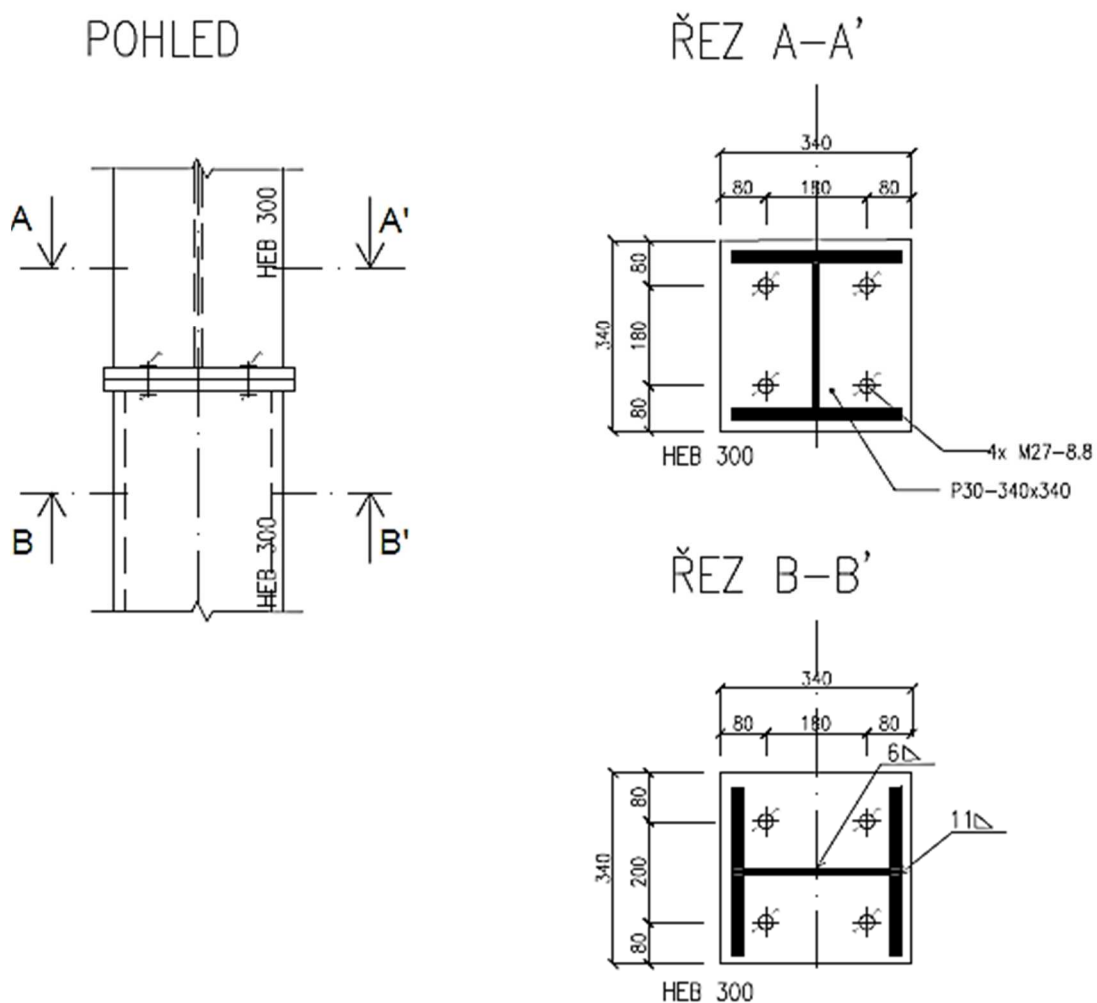
6.13.6 Přípoj vodorovného prvku SHS 150x100x5 a HEA200



Obr. 105: Schéma svařovaného přípoje SHS 150x100x5 na pásnici sloupu HEA200

Tento přípoj se nachází v místě umístění pohonu vyhrnovacího řetězu na počátku konstrukce. Spoj je tažený, dostatečně vyztužený příčnými výztuhami z plechů tloušťky 8 mm a lze stanovit, že je tento spoj dostatečně únosný a tuhý pro přenos tahové síly a ohybového momentu ve styčniku.

6.13.7 Přípoj sloupu HEB300 ke konstrukci mostu shrnovače



Obr. 106: Schéma přípoje sloupku HEB300 s hlavní konstrukcí mostového shrnovače pomocí čelní desky

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 158,50 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed,max} = 4,87 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 104,20 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 101,28 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 4,33 \text{ kNm}$$

$$V_{celk} = \sqrt{V_{z,Ed,max}^2 + V_{y,Ed,max}^2} = \sqrt{4,87^2 + 104,20^2} = 104,31 \text{ kN}$$

Svar tažené příčle a čelní desky

$$a \geq t_{fb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 19 = 10,45 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 11 \text{ mm}$

Svar stojiny a čelní desky

$$a \geq t_{wb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 11 = 6,00 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 6,00 \text{ mm}$

Svar tlačené pásnice a čelní desky

Návrh účinné tloušťky $a = 11,00 \text{ mm}$

- *Konec pásnice není upraven pro přenos tlakové síly.*

Kontrola minimálních roztečí

$$e_{min} = 55 \text{ mm} \leq e_{skut} = 80 \text{ mm}$$

$$p_{min} = 90 \text{ mm} \leq p_{skut} = 180 \text{ mm}$$

Navržené rozteče přípoje vyhovují.

Výpočet únosnosti druhé řady šroubů

Čelní deska v příčném ohybu

$$m_{c1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2r_c - t_{wc}}{2} = \frac{200 - 0,8 \cdot 2 \cdot 27 - 11}{2} = 72,90 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 72,90 = 458,044 \text{ mm}$$

Konzervativně lze uvažovat jako délku náhradního T-profilu:

$$L_{eff,6p} = 0,5b_{ep} = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1b} = L_{eff,2b} = 150 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 459 \cdot 800}{1,30} = 254,22 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 150 \cdot 30^2 \cdot 355}{1,15} = 10,42 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 10,42 \cdot 10^6}{72,90} \cdot 10^{-3} = 571,74 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 150 \cdot 30^2 \cdot 355}{1,15} = 10,42 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,cp} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(80; 1,25 \cdot 72,90) = 80 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,ep} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 10,42 \cdot 10^6 + 80,00 \cdot 508,43 \cdot 10^3}{72,90 + 80,00} \cdot 10^{-3} \\ = 402,32 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 508,43 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{396,98; 402,32; 508,43\} = 396,98 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stojina nosníku v tahu

Účinná výška stojiny nosníku v tahu:

$$b_{eff,1wb} = L_{eff,b} = 150 \text{ mm}$$

Návrhová únosnost stojiny nosníku v tahu:

$$F_{T,wc,Rd,row1} = \frac{b_{eff,1wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{150 \cdot 11 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 509,35 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 1. řady šroubů:

$$F_{T,Rd} = \min\{509,35; 396,98\} = 396,98 \text{ kN}$$

Momentová únosnost styčnicku

Vzdálenost řady šroubů od středu otáčení spoje:

$$h_1 = 240 \text{ mm}$$

$$h_2 = 60 \text{ mm}$$

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{j,Rd} = F_{T,Rd} \cdot h = 396,98 \cdot 0,240 + 396,98 \cdot 0,06 = 119,09 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 119,09 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed,max} = 101,28 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na momentovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Pro přenos posouvající síly se použije poslední řada šroubu.

Únosnost šroubu ve stříhu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 459 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 141,23 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otláčení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{180}{3 \cdot 30} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 1,75 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{80}{30} \\ 1,4 \frac{180}{30} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 7,46 \\ 6,70 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 30 \cdot 30 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 882,69 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{882,69; 141,23\} = 141,23 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 2 \cdot 141,23 = 282,46 \text{ kN} \geq V_{celk} = 104,31 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na smyk.

Kombinace stříhu a tahu

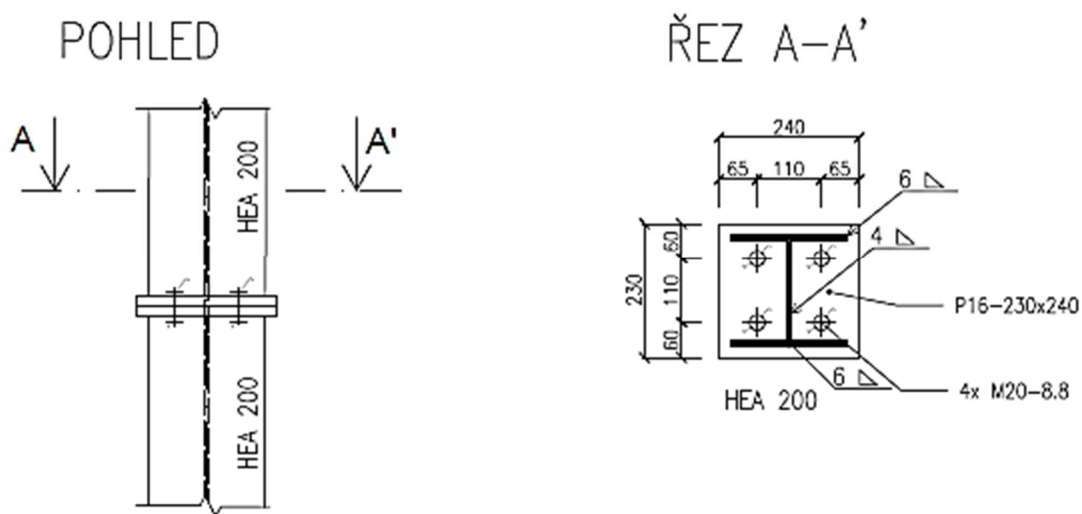
$$\frac{F_{z,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{104,31}{2 \cdot 282,46} + \frac{158,50}{1,4 \cdot 396,98 \cdot 2} = 0,327 \leq 1,0$$

Styčník vyhovuje na kombinaci stříhu a tahu.

6.13.8 Přípoj sloupu HEA200 ke konstrukci mostu shrnovače

Přípoj sloupu na hlavní konstrukce je navržen pomocí čelních desek a šroubů M20 třídy pevnosti 8.8.



Obr. 107: Schéma přípoje sloupku HEA200 s hlavní konstrukcí mostového shrnovače pomocí čelní desky

Maximální vnitřní síly:

$$N_{Ed,max} = 11,37 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,max} = -48,44 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed,max} = 78,28 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed,max} = 11,48 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed,max} = 9,46 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 12,27 \text{ kNm}$$

$$V_{celk} = \sqrt{V_{z,Ed,max}^2 + V_{y,Ed,max}^2} = \sqrt{78,28^2 + 11,48^2} = 79,11 \text{ kN}$$

Svar tažené příčle a čelní desky

$$a \geq t_{fb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 10 = 5,5 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 6,00 \text{ mm}$

Svar stojiny a čelní desky

$$a \geq t_{wb} \cdot 0,55 = 0,55 \cdot 6,5 = 3,5 \text{ mm}$$

Návrh účinné tloušťky $a = 4,00 \text{ mm}$

Svar tlačené pásnice a čelní desky

Návrh účinné tloušťky $a = 6,00 \text{ mm}$

Výpočet únosnosti druhé řady šroubů

Čelní deska v příčném ohybu

$$m_{c1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2r_c - t_{wc}}{2} = \frac{110 - 0,8 \cdot 2 \cdot 18 - 6,5}{2} = 37,35 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1p} = 2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 37,35 = 234,68 \text{ mm}$$

Konzervativně lze uvažovat jako délku náhradního T-profilu:

$$L_{eff,6p} = 0,5b_{ep} = 0,5 \cdot 200 = 100 \text{ mm}$$

Účinná délka náhradního T-profilu:

$$L_{eff,1b} = L_{eff,2b} = 100 \text{ mm}$$

Únosnost šroubu v tahu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 245 \cdot 800}{1,30} = 135,69 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky pro jednotlivé způsoby porušení:

Způsob porušení 1: Vznik dvou plastických kloubů v místě výztuhy (stěny průřezu) a osy šroubu.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 100 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,98 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 1,98 \cdot 10^6}{37,35} \cdot 10^{-3} = 212,05 \text{ kN}$$

Způsob porušení 2: Dochází k porušení šroubu v tahu a vzniká jeden plastický kloub v místě výztuhy.

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,cb} \cdot t_{fp}^2 \cdot f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 100 \cdot 16^2 \cdot 355}{1,15} = 1,98 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$n_{p,cp} = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(60; 1,25 \cdot 37,35) = 60 \text{ mm}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n_{p,ep} \cdot \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n_{ep}} = \frac{2 \cdot 1,98 \cdot 10^6 + 60,00 \cdot 271,38 \cdot 10^3}{37,35 + 60,00} \cdot 10^{-3} \\ = 207,94 \text{ kN}$$

Způsob porušení 3: Porušení šroubů v tahu.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 271,38 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}\} = \min\{212,05; 207,94; 271,38\} = 207,94 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 2.

Stojina nosníku v tahu

Účinná výška stojiny nosníku v tahu:

$$b_{eff,1wb} = L_{eff,b} = 100 \text{ mm}$$

Návrhová únosnost stojiny nosníku v tahu:

$$F_{T,wc,Rd,row1} = \frac{b_{eff,1wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{100 \cdot 6,5 \cdot 355}{1,15} \cdot 10^{-3} = 200,65 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 1. řady šroubů:

$$F_{T,Rd} = \min\{200,65; 207,94\} = 200,65 \text{ kN}$$

Momentová únosnost styčnicku

Vzdálenost řady šroubů od středu otáčení spoje:

$$h_1 = 145 \text{ mm}$$

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{j,Rd} = F_{T,Rd} \cdot h = 200,65 \cdot 0,145 = 29,09 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd} = 29,09 \text{ kNm} \geq M_{y,Ed,max} = 9,46 \text{ kNm}$$

Styčnick vyhovuje na momentovou únosnost.

Návrhová smyková únosnost styčnicku

Pro přenos posouvající síly se použije poslední řada šroubu.

Únosnost šroubu ve střihu:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 245 \cdot 800}{1,30} \cdot 10^{-3} = 75,38 \text{ kN}$$

Únosnost šroubu v otlačení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{f_{ub}}{f_{up}} \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{800}{510} \\ \frac{110}{3 \cdot 22} - 0,25 \\ 1,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 1,57 \\ 1,42 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 2,8 \cdot \frac{60}{22} \\ 1,4 \frac{110}{22} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{c} 7,64 \\ 5,30 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 20 \cdot 16 \cdot 510}{1,30} \cdot 10^{-3} = 313,86 \text{ kN}$$

$$F_{Rd} = \min\{F_{b,Rd}; F_{v,Rd}\} = \min\{313,86; 75,38\} = 75,38 \text{ kN}$$

Smykovou sílu přenáší horní a spodní řada šroubů.

$$F_{Rd} = 2 \cdot 75,38 = 150,76 \text{ kN} \geq V_{celk} = 79,11 \text{ kN}$$

Styčník vyhovuje na smyk.

6.14 Posudek vodorovných a svislých deformací konstrukce vyhrnovacího řetězu

V této kapitole je proveden posudek konstrukce pro vyhrnovací řetěz umístěné pod hlavní ocelovou konstrukcí mostového shrnovače s ohledem na splnění požadavků mezního stavu použitelnosti. Výsledné přetvoření, které vzniká od působení dynamického a provozního zatížení (proměnné zatížení) na konstrukci musí splňovat limity deformací v souladu s ČSN EN 1993-1-1.

6.14.1 Vodorovné prvky

- Podélný nosník HEB160:

$$l = 2166 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 0,2 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{2166}{250} = 8,66 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 8,66 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 0,2 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník HEB160 vyhovuje na svislý průhyb.

- Podélný nosník HEA200:

$$l = 1083 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 0,2 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{1083}{250} = 5,42 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 5,42 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 0,2 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník HEA200 vyhovuje na svislý průhyb.

- Podélný nosník T:

$$l = 2410,50 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 0,3 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{2410}{250} = 9,64 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,64 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 0,3 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník T100 vyhovuje na svislý průhyb.

- Příčný nosník RHS 120x80x5:

$$l = 792,38 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 2,0 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{792,38}{250} = 3,16 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 3,16 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 2,0 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník RHS 120x80x5 vyhovuje na svislý průhyb.

- Příčný nosník RHS 100x100x5:

$$l = 792,38 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 2,0 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{792,38}{250} = 3,16 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 3,16 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 2,0 \text{ mm}$$

Vodorovný nosník RHS 100x100x5 vyhovuje na svislý průhyb.

6.14.2 Svislé prvky

- Sloup HEB300:

$$l = 1418 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 2,8 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 0,8 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{150} = \frac{1418}{150} = 9,45 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,45 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 2,8 \text{ mm}$$

Sloup konstrukce vyhovuje na deformaci ve vodorovném směru.

- Sloup HEB160:

$$l = 1418 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,7 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 4,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{150} = \frac{1418}{150} = 9,45 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 9,45 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 4,5 \text{ mm}$$

Sloup konstrukce vyhovuje na deformaci ve vodorovném směru.

- Sloup HEA200:

$$l = 1586 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 3,4 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 2,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{150} = \frac{1586}{150} = 10,57 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 10,57 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 3,4 \text{ mm}$$

Sloup konstrukce vyhovuje na deformaci ve vodorovném směru.

6.14.3 Výztužné prvky

- Skloněná výztuha:

$$l = 1854 \text{ mm}$$

$$\delta_{y,max} = 2,6 \text{ mm}$$

$$\delta_{z,max} = 1,6 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = \frac{l}{250} = \frac{1854}{250} = 7,42 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 7,42 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 2,6 \text{ mm}$$

Skloněné výztuhy vyhovují na svislý průhyb.

Vodorovný nosník výztuhy JISTĚ vyhovuje na svislý průhyb.

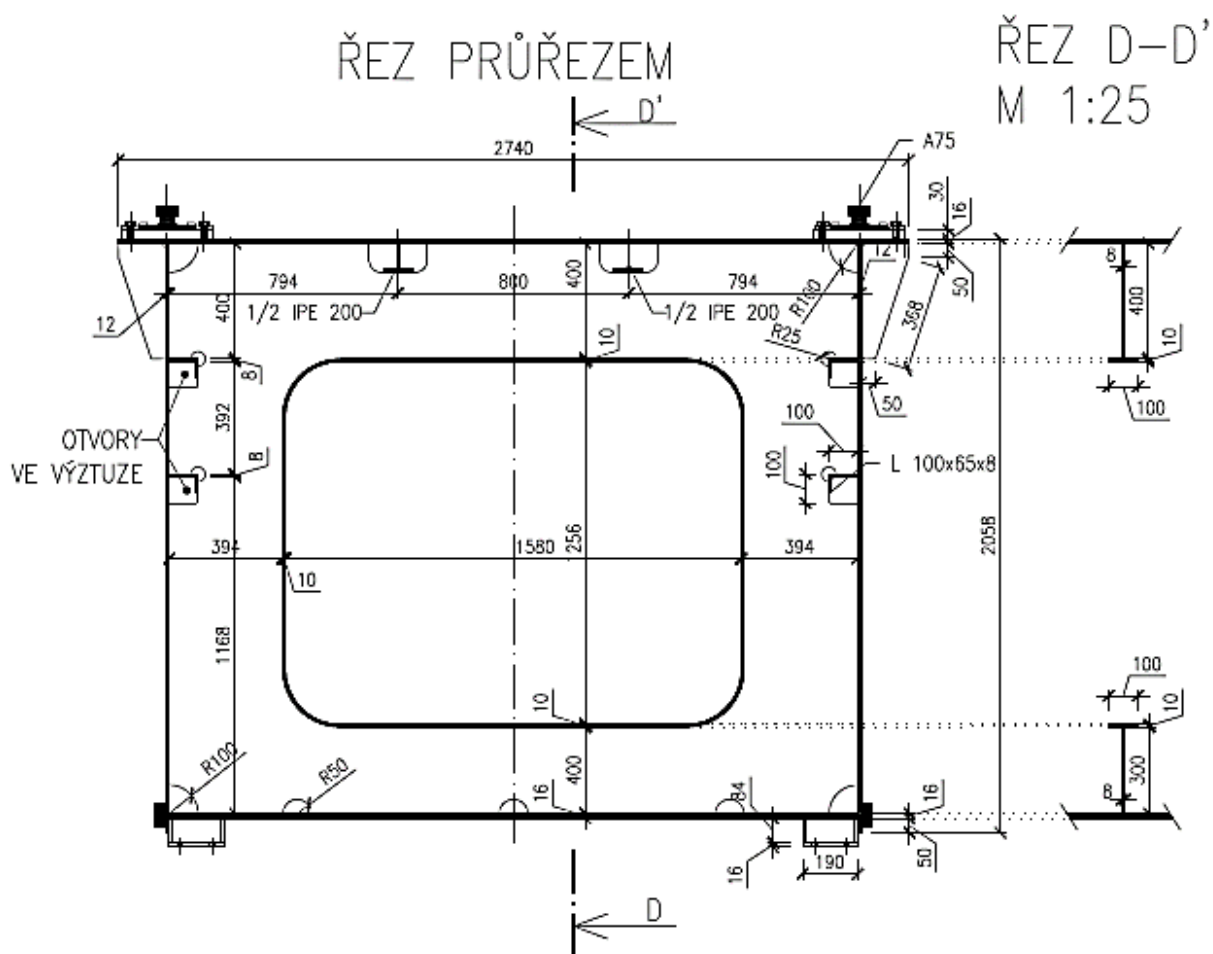
7 Hlavní nosník mostového shrnovače

Hlavní nosník mostového shrnovače má délku cca 37,59 m a tvoří konstrukci pro zavěšení konstrukce vyhrnovacího řetězu a umístění vozíku. Nosník je tvořený uzavřeným komorovým průřezem, který je v tlačené oblasti vyztužený podélnými výztuhami na stěnách nosníku tloušťky 12 mm dvěma profily Li 100x65x8 a na horní pásnici dvěma profily ½ IPE 200. Nosník je vyztužený v místě závěsů konstrukce vyhrnovacího řetězu příčnými výztuhami s otvorem velikosti 1580x1258 mm, který zajišťuje průlez pro revizi a kontrolu vnitřního prostoru konstrukce. V místě podpor je vytvořen náběh, který hlavní průřez zmenšuje z 2008 mm na 1008 mm. Na horní pásnici tloušťky 16 mm jsou umístěny kolejnice typu A75, které umožňují pojezd vozíku po konstrukci.

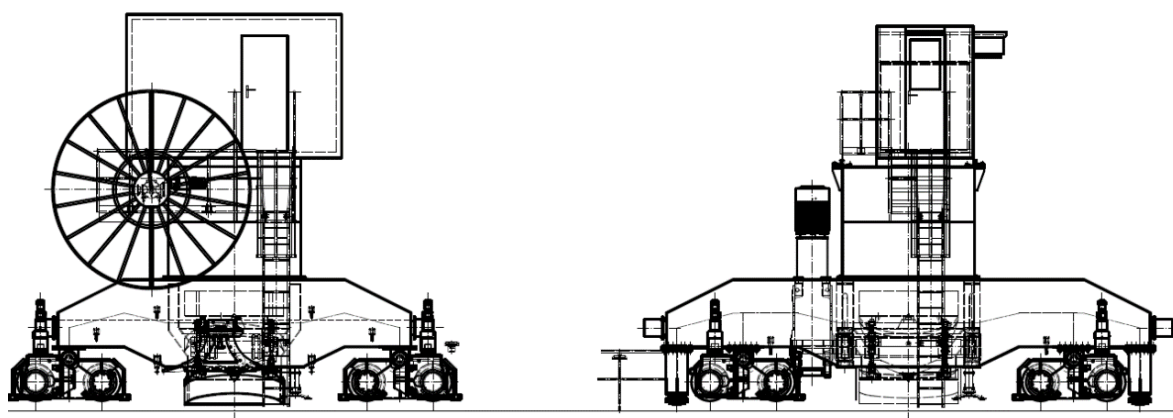
7.1 Statický model hlavního nosníku konstrukce

Konstrukce mostu je uložena na vahadlech a k nim připojena přírubovým spojem (dochází k přenosu ohybových momentů). Vahadla jsou umístěna na kolejnicích, které představují podpory hlavní konstrukce mostového shrnovače. Proto je v software Scia Engineer mimo hlavní konstrukci vymodelovány také vahadla (tvar je odečten z výkresu [20] pomocí střednice průřezu), jejíž konce jsou podepřeny dle příslušného umožněného pohybu po kolejnicích. Konstrukce je podepřena ve svislém směru na kolejnicích, dále je podepřena v úrovni kolejnic ve směru podélném. Tyto reakce představují možné třecí síly vznikající v horní úrovni kolejnice při pohybu vozíku. V příčném směru je konstrukce podepřena pouze na pravém vahadle, jelikož je zde uložena bez jakékoliv možné vůle pojezdového kole, na levé kolejnici je umožněn pojezdovým kolům větší rozptyl z hlediska možného pohybu v příčném směru, který je vytvořený dostatečnou vůlí pojezdového kola uloženého na kolejnici. Vahadla jsou modelována jako tuhé pruty (prvky se zvýšeným modulem pružnosti). Prutový nosník je tvořen příslušnými odpovídajícími průřezy, které se do software naimportovaly

z kreslicího software AutoCAD, tak aby se vystihlo rozložení hmotnosti po nosníku.

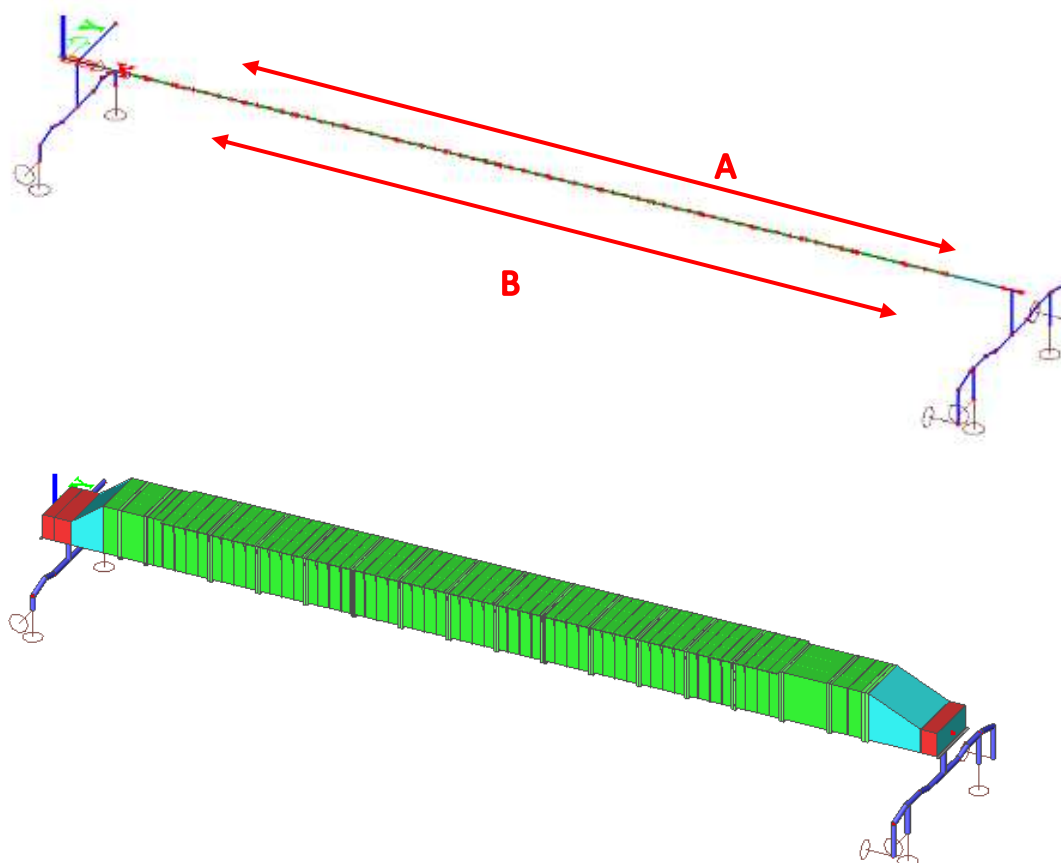


Obr. 108: Tvar průřezu v místě hlavní příčné výztuhy



Obr. 109: Tvar vahadel

Konstrukce vahadel slouží pouze pro přenos vnitřních sil z hlavního nosníku do reakcí na hlavní kolejnice konstrukce s označením A a B. Pro statickou analýzu hlavního nosníku představuje pohyb konstrukce po hlavních kolejnicích. Pruty jsou nastaveny se zvýšenou tuhostí (modul pružnosti je zvýšen o dva řády) a s nulovou hmotností jelikož vyšetřujeme hlavní uzavřený komorový nosník. Přípoj k hlavní konstrukce je rámový, což odpovídá reálnému přírubovému přípoji.



Obr. 110: Statický model konstrukce v software Scia Engineer

7.2 Zatížení konstrukce

Zatížení hlavního nosníku mostového shrnovače borité rudy je stanoveno v souladu s ČSN EN 1991-1-1, ČSN 27 7008 A ČSN EN 1998-1. Na danou konstrukci je v software Scia Engineer uvažováno zatížení:

- **Vlastní tíha** (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
 - je vygenerována automaticky softwarem Scia Engineer (hmotnost konstrukce je cca 49 tun)

- **Zatížení ostatní stálé** (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_G=1,1$)
 - zatížení od tíhy příčných výztuh, kabiny na mostní konstrukci, rozvodny, bubnu, hmotnosti výsypky, reakce od vozíku, reakce od konstrukce vyhrnovacího řetězu
 - jelikož jsou příčné výztuhy vyztuženy prvky délky 50 mm a tloušťky 10 mm, je jejich hmotnost stanovena analyticky a do modelu zavedena jako spojitě zatížení v místě výztuhy
 - do výpočtu je zavedena vlastní tíha kolejnice jako spojitě zatížení v hodnotě $g = 0,54 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ve vzdálenosti 6,260 m až 28,100 m
 - vlastní tíha od zábradlí a pochozího roštu nemá vůči ostatním hodnotám zatížení na konstrukci významný vliv, proto jsou jeho hodnoty zanedbány

Příčná výztuha spodní (resp. horní)

Objemová tíha oceli: $\gamma = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Délka výztuhy: $l = 2390 \text{ mm}$

Objem výztuhy: $V = 2,39 \cdot 0,01 \cdot 0,05 = 1,2 \cdot 10^{-3}$

Síla působící v místě výztuhy: $F = V \cdot \gamma = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 78,50 = 0,094 \text{ kN}$

Příčná výztuha vnitřní hlavní

Objemová tíha oceli: $\gamma = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Délka výztuhy: $l = 5412 \text{ mm}$

Objem výztuhy: $V = 5,41 \cdot 0,01 \cdot 0,05 = 2,71 \cdot 10^{-3}$

Síla působící v místě výztuhy:
 $F = V \cdot \gamma = 2,71 \cdot 10^{-3} \cdot 78,50 = 0,220 \text{ kN}$

Příčná výztuha vnitřní

Objemová tíha oceli: $\gamma = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Délka výztuhy: $l = 4780 \text{ mm}$

Objem výztuhy: $V = 4,78 \cdot 0,01 \cdot 0,05 = 2,39 \cdot 10^{-3}$

Síla působící v místě výztuhy:
 $F = V \cdot \gamma = 2,39 \cdot 10^{-3} \cdot 78,50 = 0,190 \text{ kN}$

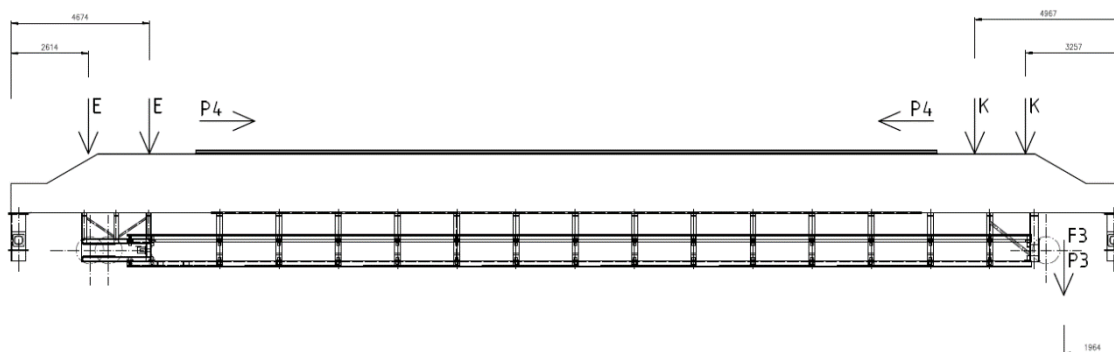
Ostatní zatížení je stanoveno technologem a odečteno z výkresové dokumentace [20]:

- síla od bubnu $F = 20 \text{ kN}$
- zatížení od kabiny $F = 2 \times 10 \text{ kN}$
- síla od rozvodny $F = 2 \times 50 \text{ kN}$
- zatížení od výsypky $F = 10 \text{ kN}$
- zatížení od materiálu ve výsypce $F = 2 \times 10 \text{ kN}$

Reakce od konstrukce pro vyhrnovací řetěz byly stanoveny v charakteristických hodnotách pomocí software Scia Engineer a jsou uvedeny v tabulce č. 4. Kde jako *A* je označena levá řada závěsů a *B* pravá řada závěsů při pohledu na nosník od rozvodny, čísla jsou pak označeny jednotlivé závěsy v řadě.

Stálé - vlastní tíha celkem																		
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_x [kN]	6,8	4,1	15,7	16,9	13,4	14,4	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,5	13,8	6,1
R_y [kN]	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1
R_z [kN]	-0,4	-1,1	-2,1	-3,7	-3,0	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,3	-3,1	-1,0
M_x [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M_y [kNm]	0,1	0,6	0,5	0,8	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,2
M_z [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ex [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ez [mm]	850,0	1075,0	1075,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1125,0	1125,0	1125,0
ey [mm]	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0
B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_x [kN]	6,8	4,1	15,7	16,9	13,4	14,4	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,5	13,8	6,1
R_y [kN]	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1
R_z [kN]	0,4	1,1	2,1	3,7	3,0	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	1,0
M_x [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M_y [kNm]	-0,1	-0,6	-0,5	-0,8	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,2
M_z [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ex [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ez [mm]	850,0	1075,0	1075,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1125,0	1125,0	1125,0
ey [mm]	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0

Tab. 4: Reakce od stálého zatížení - konstrukce pro vyhrnovací řetěz



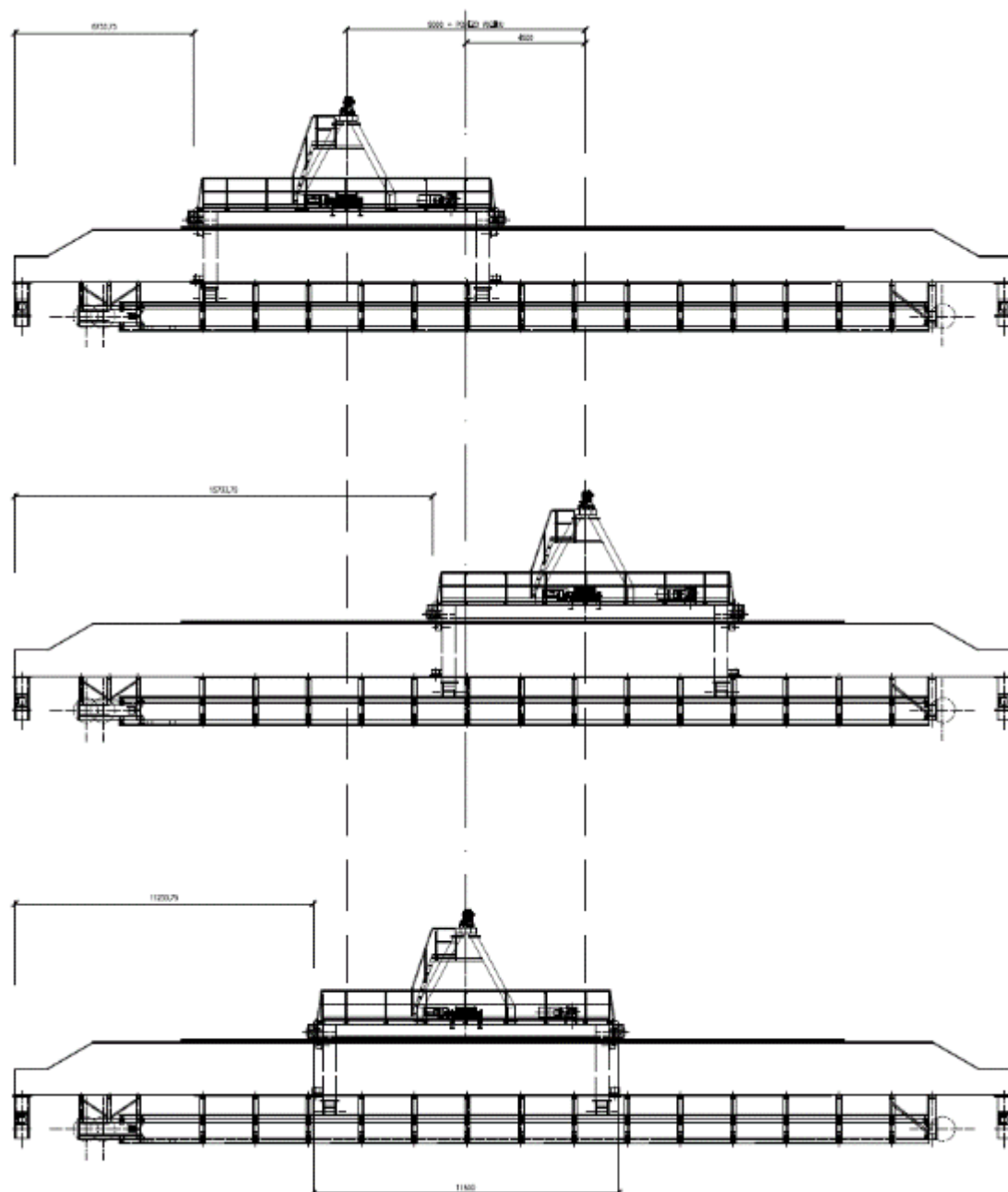
Obr. 111: Schéma rozmístění stálého zatížení

Reakce od vozíku jsou uvažovány pro dva stavy – rozrušovací bránu v horizontální poloze a v pracovní poloze. Rozvor podvozku pro svislé reakce je 11 500 mm a pojezd vozíku na obě strany je možný do vzdálenosti 4 500 mm (pojezd vozíku je tedy 9 000 mm). Do zatížení jsou zavedeny tři stavy polohy vozíku, na okrajích a téměř uprostřed nosníku.

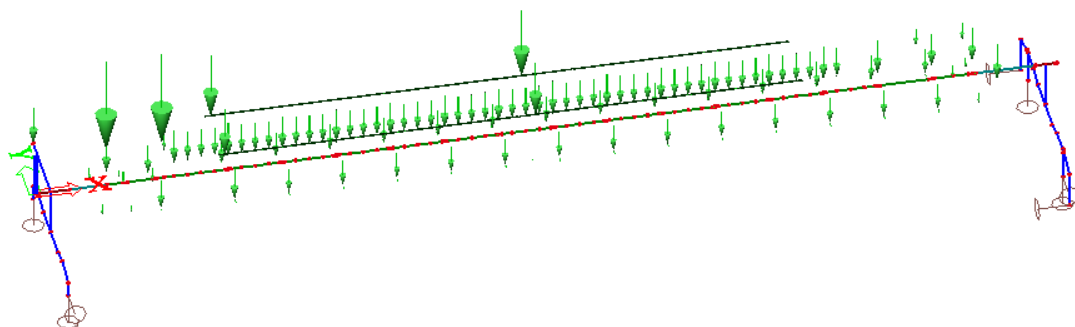
Pracovní poloha brány								
Vlastní tíha								
	A				B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	33,54	36,95	33,54	36,95	26,1	29,28	26,1	29,28
R_y [kN]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	1,14	0,00	0,00	1,17	0,00	1,17	1,14	0,00
e_x [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0
e_y [mm]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
e_z [mm]	925	925	925	925	925	925	925	925

Horizontální poloha brány								
Vlastní tíha								
	A				B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	23,4	26,72	23,4	26,72	23,38	26,68	23,38	26,68
R_y [kN]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
e_x [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0
e_y [mm]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
e_z [mm]	925	925	925	925	925	925	925	925

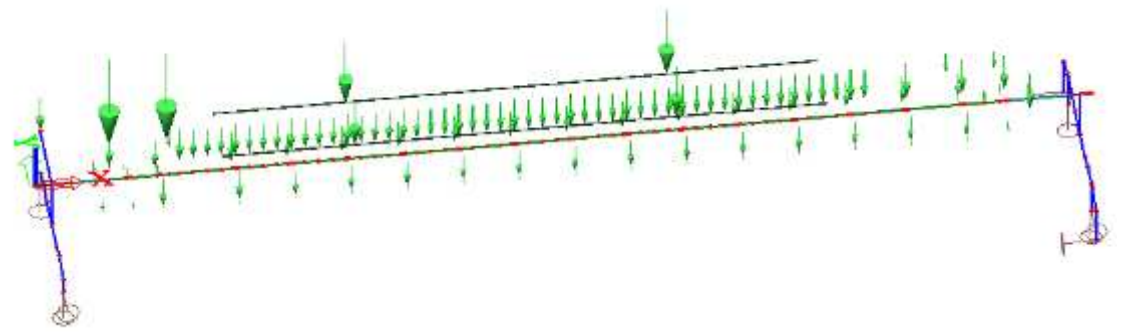
Tab. 5: Reakce od stálého zatížení – konstrukce vozíku



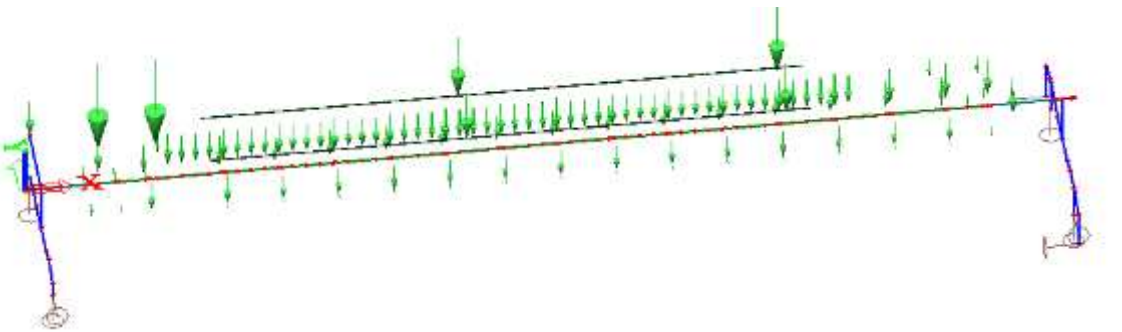
Obr. 112: Schéma poloh vozíku na mostové konstrukce



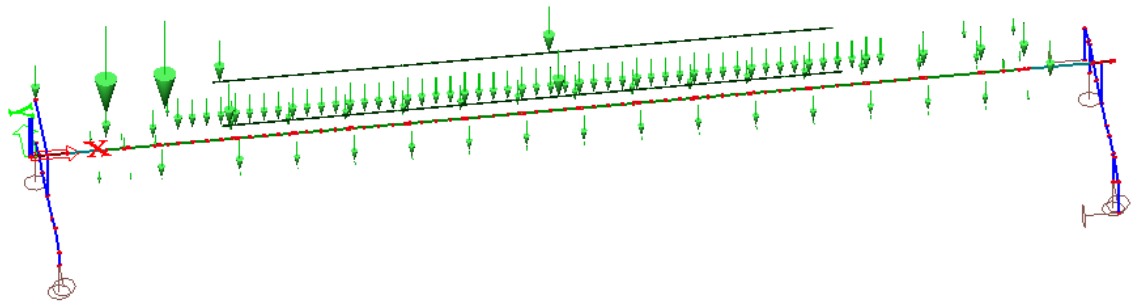
Obr. 113: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P1



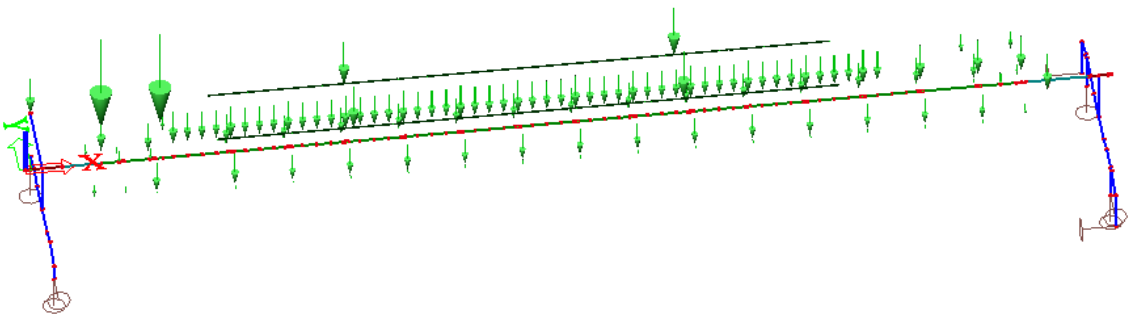
Obr. 114: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P2



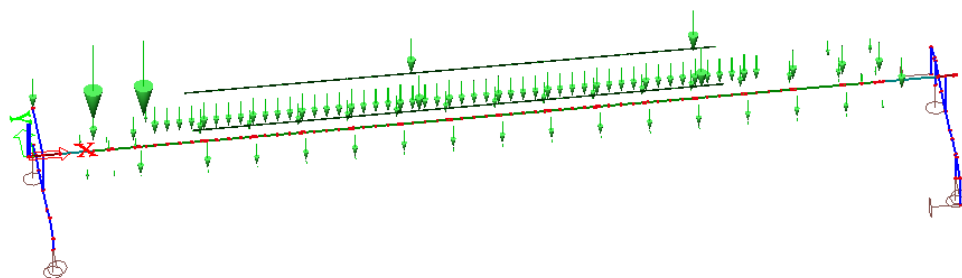
Obr. 115: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P3



Obr. 116: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H1



Obr. 117: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H2



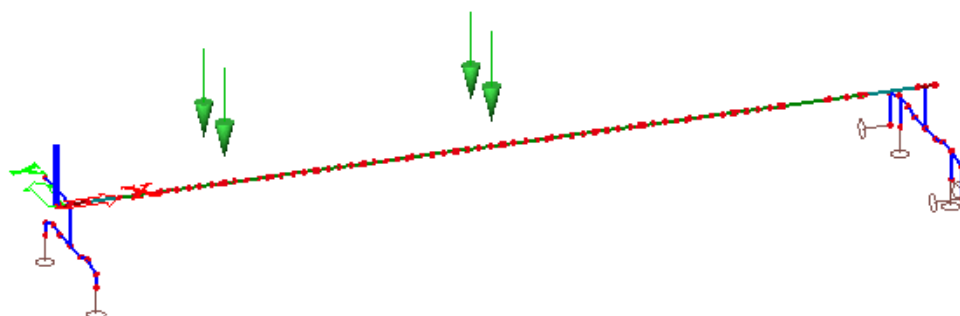
Obr. 118: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H3

- **Zatížení proměnné** – (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QF}=1,2$)
 - zatížení vznikající při provozu konstrukce, reakce vozíku ze stavu proměnných zatížení, reakce od konstrukce pro vyhrnovací řetěz a mechanické zařízení na konstrukci, pojezd vozíku
 - pojezd vozíku $F = 94 \text{ kN}$

Reakce vznikající při působení zatížení na pochozí rošty vozíku jsou zadány ve třech polohách vozíku jako pro zatížení stálé.

Užitná plocha								
A					B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$R_z \text{ [kN]}$	11,66	11,66	11,66	11,66	11,8	11,8	11,8	11,8
$R_y \text{ [kN]}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$R_x \text{ [kN]}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 6: Reakce od proměnného zatížení – pochozí rošty konstrukce vozíku



Obr. 119: Zatěžovací stav – užitné pochozí rošty

ZAŘÍZENÍ + ŘETĚZ UŽITÉ																		
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_x [kN]	8,5	0,9	-5,2	-0,6	-6,4	-7,4	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,6	-18,7	25,2
R_y [kN]	-14,5	-6,3	-14,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	17,0	20,7
R_z [kN]	2,4	3,1	6,3	11,3	7,9	8,1	8,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,2	8,2	8,2	8,0	1,8
M_x [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1
M_y [kNm]	-1,6	-2,5	-5,7	-9,4	-6,1	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,9	-6,2	-1,8
M_z [kNm]	-4,4	-3,4	-4,8	-8,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	2,6	20,0
ex [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ez [mm]	850,0	1075,0	1075,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1125,0	1125,0	1125,0
ey [mm]	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0
B	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0
R_x [kN]	52,4	4,7	-32,1	2,3	6,0	7,5	7,2	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3	7,5	6,7	-12,2	126,3
R_y [kN]	-58,7	-24,2	-57,2	-1,9	-1,8	-1,5	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,2	0,5	69,7	86,8
R_z [kN]	2,4	3,1	6,3	11,3	7,9	8,1	8,0	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,2	8,2	8,2	8,0	1,8
M_x [kNm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
M_y [kNm]	-1,6	-2,5	-5,6	-9,4	-6,1	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,6	-6,9	-6,6	-1,6
M_z [kNm]	-15,7	-12,0	-16,5	-1,6	-1,6	-1,3	-1,2	-1,0	-0,8	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,4	12,3	84,3
ex [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ez [mm]	850,0	1075,0	1075,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1125,0	1125,0	1125,0
ey [mm]	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0	1100,0

Tab. 7: Reakce od proměnného zatížení - konstrukce pro vyhrnovací řetěz

Technologie 1								
A					B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	6,91	25,52	6,91	25,52	5,72	26,78	5,72	26,78
R_y [kN]	85,84	0,00	85,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	0,00	0,05	0,00	0,05	-0,05	0,00	-0,05	0,00
e_x [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0
e_y [mm]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
e_z [mm]	925	925	925	925	925	925	925	925

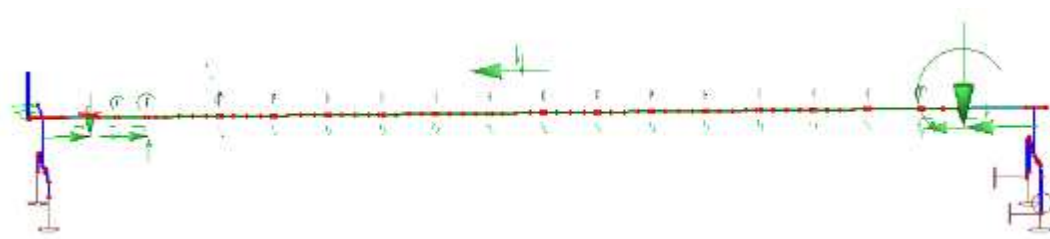
Technologie 2								
A					B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	7,08	25,35	7,08	25,35	5,88	26,61	5,88	26,61
R_y [kN]	85,84	0,00	85,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	0,00	0,05	0,00	0,05	-0,05	0,00	-0,05	0,00

Tab. 8: Reakce od proměnného zatížení – pracovní poloha brány vozíku

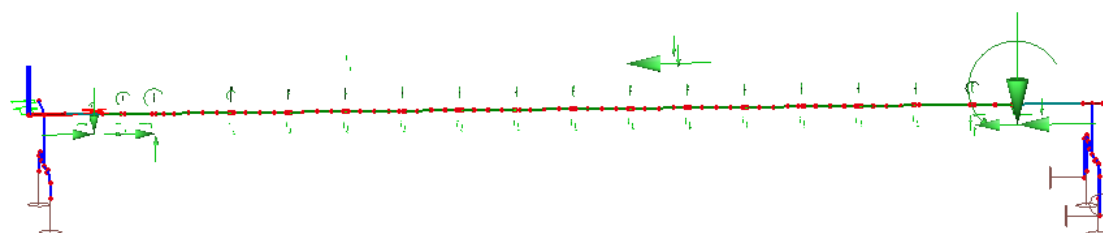
Technologie 1								
A					B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	5,43	27	5,43	27	6,91	25,60	6,91	25,60
R_y [kN]	85,84	0,00	85,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	0,00	0,05	0,00	0,05	-0,05	0,00	-0,05	0,00
e_x [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0
e_y [mm]	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
e_z [mm]	925	925	925	925	925	925	925	925

Technologie 2								
A					B			
	1	2	3	4	1	2	3	4
R_z [kN]	5,26	27,17	5,26	27,17	6,75	25,75	6,75	25,75
R_y [kN]	85,84	0,00	85,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R_x [kN]	0,00	0,05	0,00	0,05	-0,05	0,00	-0,05	0,00

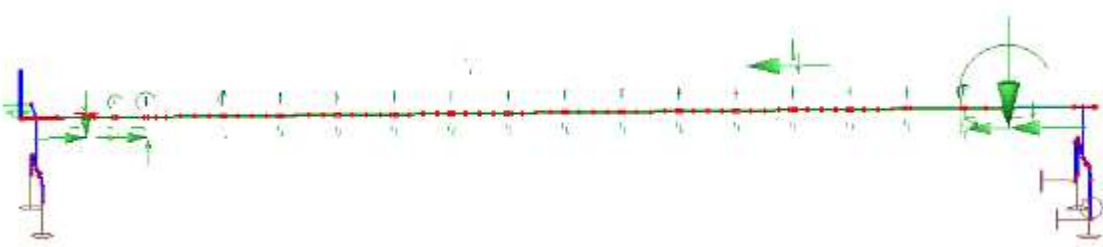
Tab. 9: Reakce od proměnného zatížení – horizontální poloha brány vozíku



Obr. 120: Zatěžovací stav – technologie P1



Obr. 121: Zatěžovací stav – technologie P2



Obr. 122: Zatěžovací stav – technologie P3

- **Zatížení mimořádné – náraz vozíku** – (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QF}=1,1$)
 - zatížení představuje možnost nárazu vozíku na nárazníky v hodnotě 75 kN

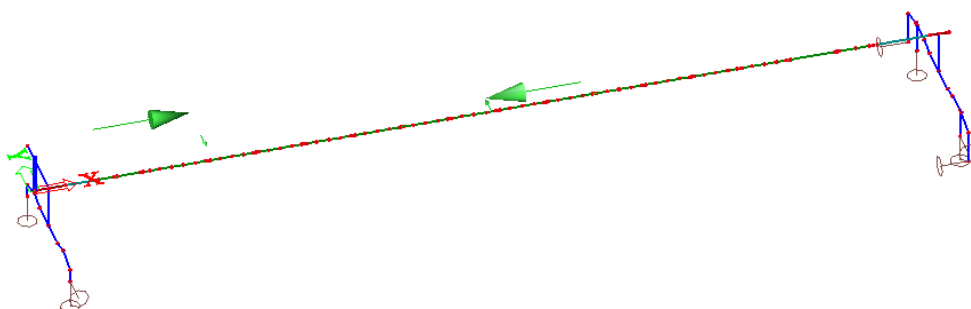


Obr. 123: Zatěžovací stav – náraz vozíku (poloha vozíku P1, H1)

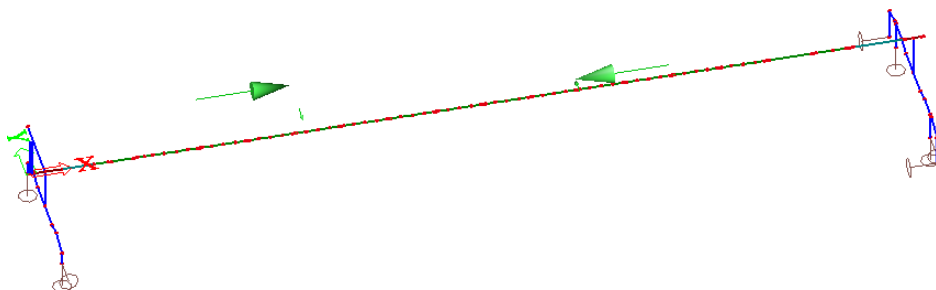


Obr. 124: Zatěžovací stav – náraz vozíku (poloha vozíku P3, H3)

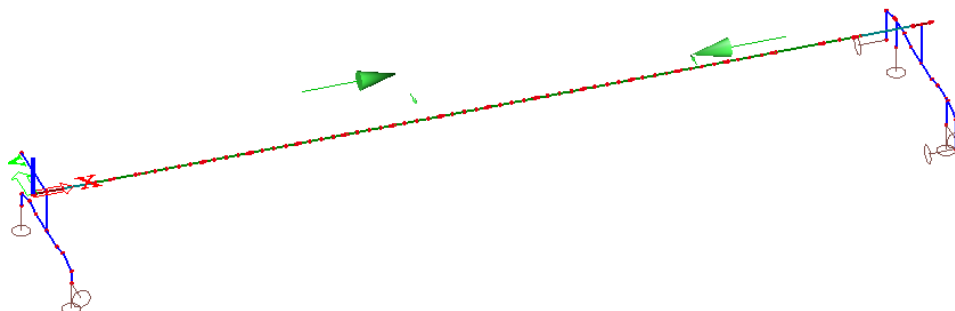
- **Zatížení proměnné – příčení vozíku** – (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QF}=1,2$)
 - síly od příčení vozíku jsou stanoveny v kap. 3.2.1.



Obr. 125: Zatěžovací stav od příčení vozíku P1

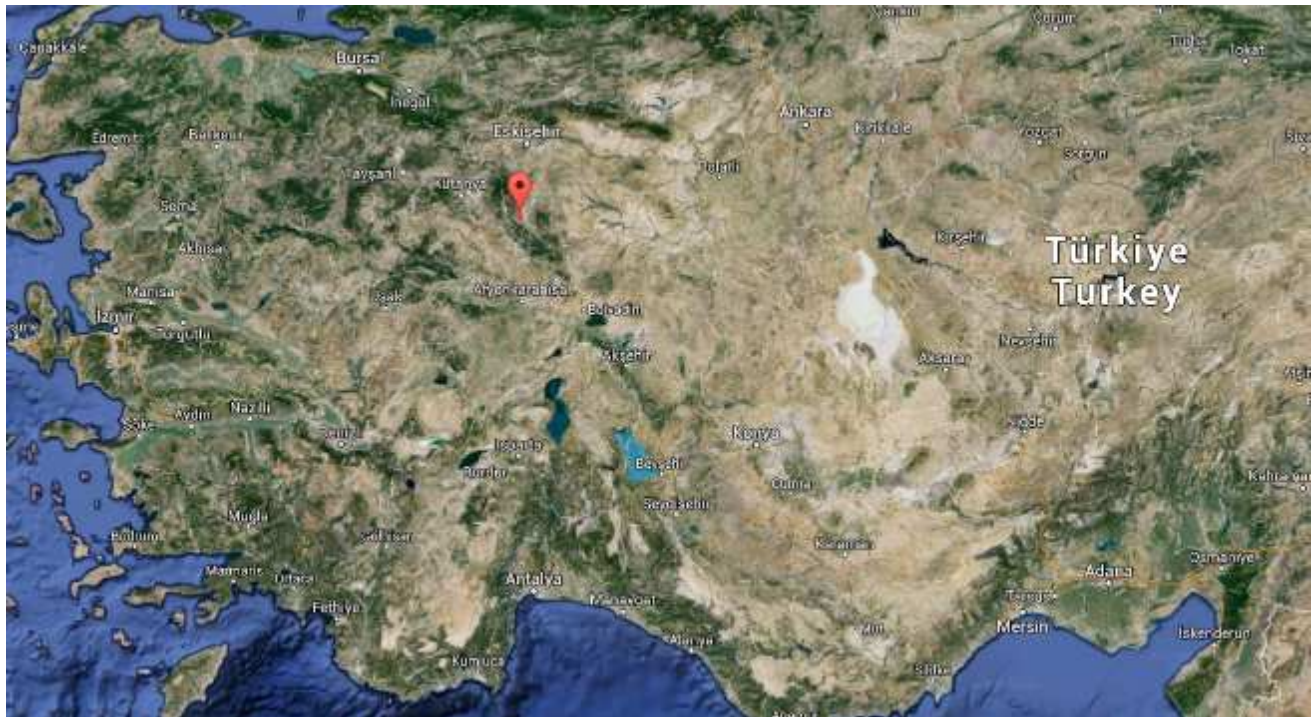


Obr. 126: Zatěžovací stav od příčení vozíku P2



Obrázek 127: Zatěžovací stav od příčení vozíku P3

- **Zatížení seismicitou** – zatížení mimořádné (dílčí součinitel dle ČSN 27 7008 $Y_{QF}=1,0$)
 - konstrukce je umístěna v oblasti Turecka, konkrétně v okrese Eskisehir, ve vesnici Kirka, kde nejbližším správním městem je Seyitgazi, je tedy nutné zohlednit vliv seismicity při analýze konstrukce
 - dynamické zatížení je stanoveno dle doporučení podle [12]



Obr. 128: Umístění shrnovače v oblasti Turecka

7.2.1 Seismické zatížení

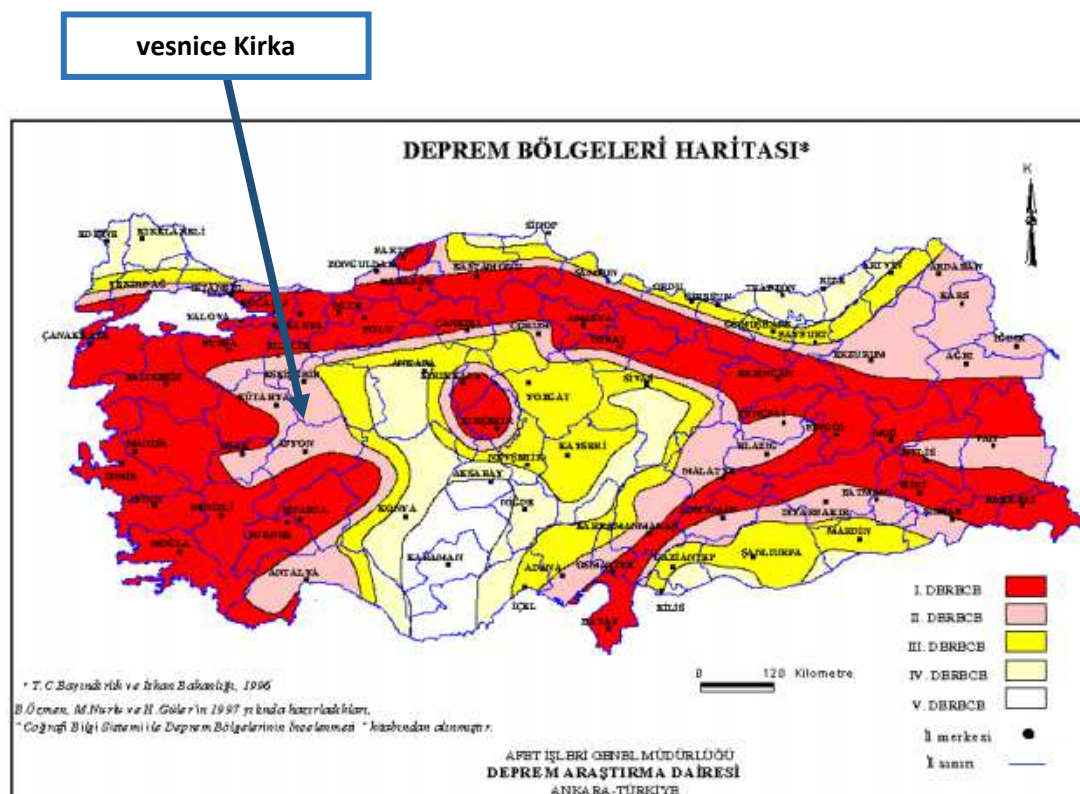
Seismické zatížení je stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1998-1, tato norma dovoluje použít dvě možnosti výpočtu – první je výpočet založený na předpokladu chování konstrukce lineárním pružným a druhý naopak nelineární, ale tomuto výpočtu se v této diplomové práci nevěnuje pozornost. Při posuzování konstrukce, která je vystavena seismickému zatížení, musí být splněny dva základní požadavky. Požadavek mezního stavu únosnosti posuzuje konstrukci z hlediska vyloučení zřícení konstrukce a mezní stav omezeného poškození určuje limitní hodnoty deformací konstrukce.

Pro zadání seismického zatížení do software Scia Engineer lze přistupovat pomocí dvou způsobů. Je možnost využít automatického generátoru seismického zatížení implementovaného do software Scia Engineer, kdy je zapotřebí specifikovat charakteristiky určené pro příslušnou seismickou oblast,

to je referenční tíhové zrychlení základové půdy, typ základové půdy a spektra pružné odezvy základové půdy dle požadavku Typ 1 a Typ 2 nebo samostatně v případě, že známe vlivy hlubinných geologických staveb. Druhým způsobem je ruční určení příčných setrvačných sil působících na konstrukci na základě pružného spektra odezvy. Tento výpočet je založen na výpočtu vlastního tvaru konstrukce a jeho periody a pak na základě přerozdělení setrvačných příčných sil v závislosti na jednotlivých hmotách diskrétních částech konstrukce se určí hodnoty těchto sil. V následujícím výpočtu jsou zobrazeny obě možnosti zadání včetně srovnání výsledných vnitřních sil vznikajících v kombinaci se seismickým zatížením.

A) Generátor seismického zatížení Scia Engineer 2015

Podle umístění konstrukce ve vesnici Kirka lze podle seismické mapy Turecka určit pro danou oblast hodnotu zrychlení základové půdy 0,3 g.



Obr. 129: Turecko – mapa seismického zatížení [4]

Peak Ground Acceleration for stiff soil	
Seismic zone	A_g
I	0.40g
II	0.30g
III	0.20g
IV	0.10g
V	no seismic provisions

Tab. 10: Hodnoty referenčního zrychlení půdy pro jednotlivé oblasti [12]

Výpočet seismického zatížení

Referenční zrychlení půdy pro oblast I: $a_g = 0,30 \text{ g}$

Třída významu pozemní stavby (*class of importance*): $\gamma_I = 1,40$

Součinitel duktility (*behaviour factor*): $q = 1,50$

* Součinitel duktility slouží pro redukci sil stanovených lineární statickou analýzou a to pro zohlednění nelineární odezvy konstrukce ať už způsobené materiálem nebo návrhem. Hodnota součinitele duktility je stanovena s ohledem na disipativní schopnost konstrukce. Je-li konstrukce namáhána zemětřesením a vzniká-li od zemětřesení určitá energie, konstrukce je dostatečně disipativní v případě, že dokáže tuto energii rozptýlit (transformovat) na energii jinou. V daném případě se předpokládá konstrukce s malým disipativním chováním.

Typ základové půdy: konzervativně je zvolen typ půdy D

Tabulka 4.3 – Třídy významu pozemních staveb

Třída významu	Pozemní stavby
I	Pozemní stavby s menším významem pro veřejnou bezpečnost, např. zemědělské stavby atd.
II	Obvyklé pozemní stavby, nepatřící do ostatních kategorií
III	Pozemní stavby, jejichž seismická odolnost je důležitá z hlediska následků spojených s jejich zřícením, např. školy, společenské haly, kulturní instituce, atd.
IV	Pozemní stavby, jejichž neporušenost během zemětřesení je životně důležitá pro ochranu občanů, např. nemocnice, hasičské stanice, elektrárny, atd.

Třída významu pozemních staveb	I	II	III	IV
Součinitel významu γ_I	0,8	1,0	1,2	1,4

Tab. 11: Třídy významu pozemních staveb dle [12]

Tabulka 3.1 – Typy základových půd

Typ	Popis stratigrafického profilu	Parametry		
		$v_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT} [počet úderů/30 cm]	c_u [kPa]
A	Skalní horninový masiv nebo geologická formace typu skalních hornin při nadloží z měkkého materiálu v maximální mocnosti do 5 m	> 800	-	-
B	Sedimenty velmi uhlého písku, štěrk nebo velmi tuhý jíl v tloušťce alespoň několik desítek metrů, s mechanickými vlastnostmi rostoucími s hloubkou	360-800	> 50	> 250
C	Mocné sedimenty středně uhlého nebo uhlého písku, štěrk nebo tuhý jíl v tloušťce od několika desítek do stovek metrů	180-360	15-50	70-250
D	Sedimenty z kyprých až středně uhlých nesoudržných zemin (případně s nebo bez vrstev soudržných zemin) nebo převážně měkkých až pevných soudržných zemin	< 180	< 15	< 70
E	Profil sestávající z povrchových aluviálních vrstev s hodnotami v_s podle typu C nebo D, o mocnosti 5 až 20 m, na tužším podkladě s $v_s > 800$ m/s			
S_1	Sedimenty sestávající z jílu nebo siltů s číslem plasticity $PI > 40$ s velkým obsahem vody, nebo sedimenty, obsahující uvedené zeminy, o mocnosti nejméně 10 m	< 100 (informativně)	-	10-20
S_2	Sedimenty ze zemin náchylných ke ztekucení, z citlivých jílů, jiné zeminy nezahnuté v typech A – E, případně S_1			

Tab. 12: Typy základových půd dle [12]

Součinitel podloží:

$$S = 1,35$$

Spektrum pružné odezvy typu 1

Nejmenší perioda kmitů:

$$T_B = 0,20$$

Největší perioda kmitů:

$$T_C = 0,80$$

Doba kmitů při konstantním spektru pružného posunu:

$$T_D = 2,00$$

Spektrum pružné odezvy typu 2

Nejmenší perioda kmitů:

$$T_B = 0,10$$

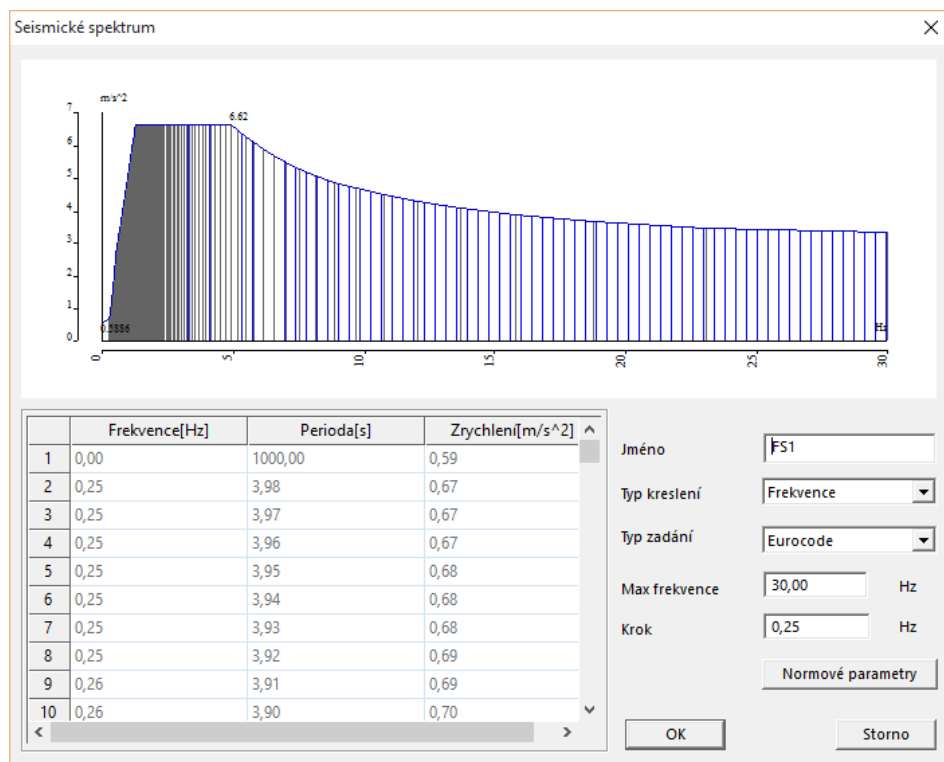
Největší perioda kmitů:

$$T_C = 0,30$$

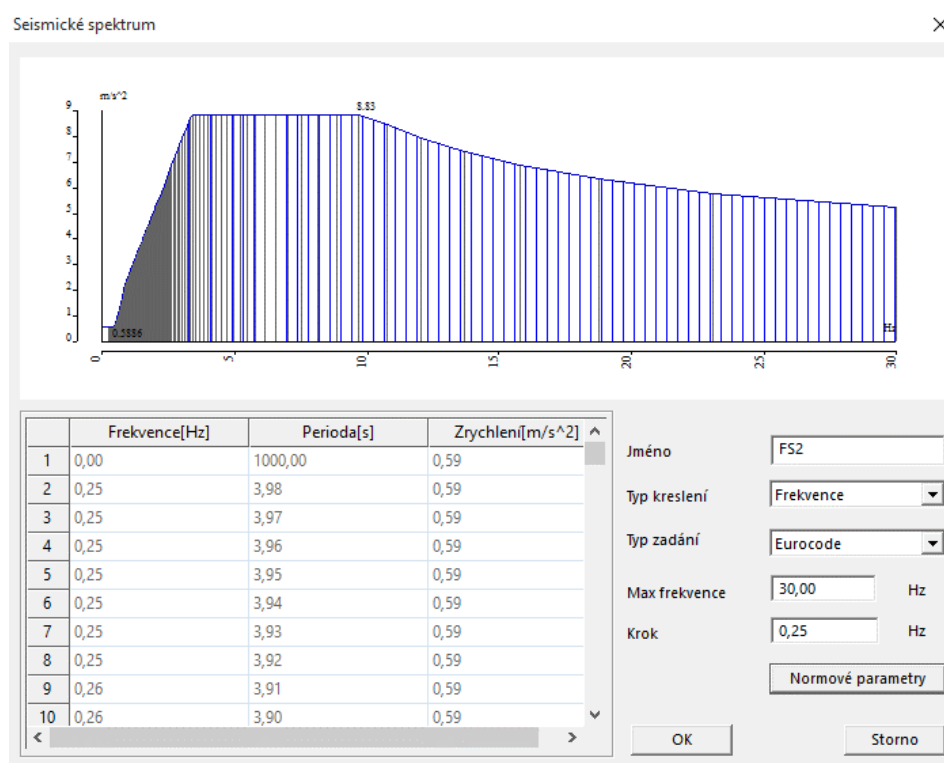
Doba kmitů při konstantním spektru pružného posunu:

$$T_D = 1,20$$

Vygenerování seismického zatížení je vytvořeno pomocí software Scia Engineer do směru osy X a Y v poměru 100 % a 30 %, a naopak pro jednotlivé směry.

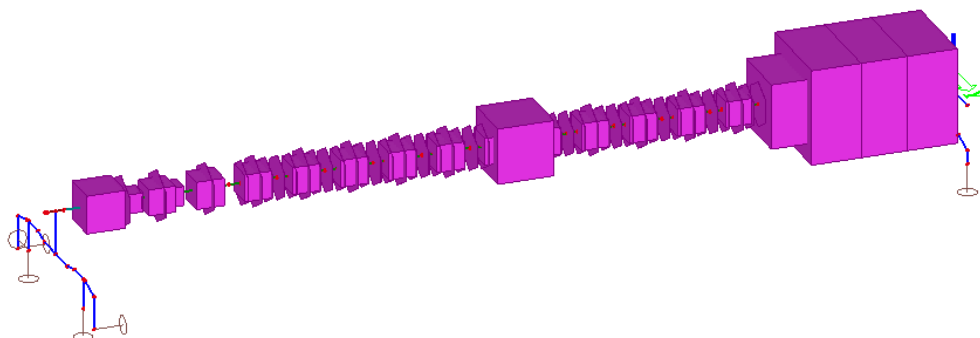


Obr. 130: Výstup ze software Scia Engineer – vodorovné spektrum pružné odezvy typu 1

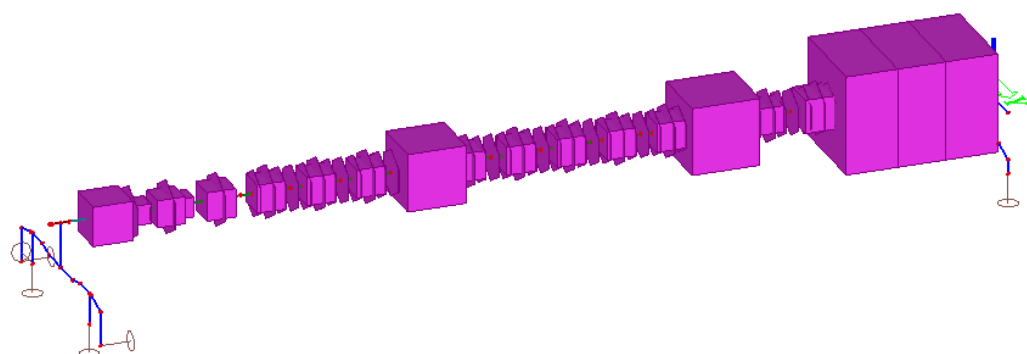


Obr. 131: Výstup ze software Scia Engineer – vodorovné spektrum pružné odezvy typu 2

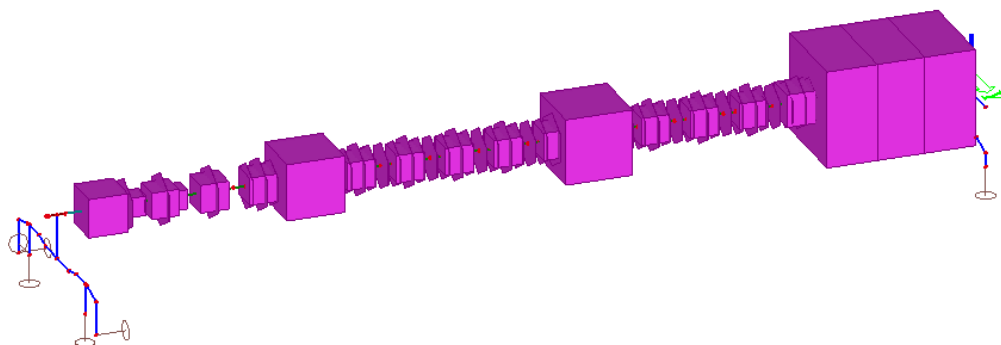
Aby seismická byla ve výsledcích zohledněna je zapotřebí definovat hmoty konstrukce, které na konstrukci působí v době zemětřesení. Hmoty jsou vygenerovány pomocí software Scia Engineer ze zatížení ostatního stálého – tedy od vozíku, konstrukce vyhrnovacího řetězu, kabiny a rozvodny. Hmoty z vlastní tíhy je v software Scia Engineer automaticky generována.



Obr. 134: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní poloha rozrušovací brány P1



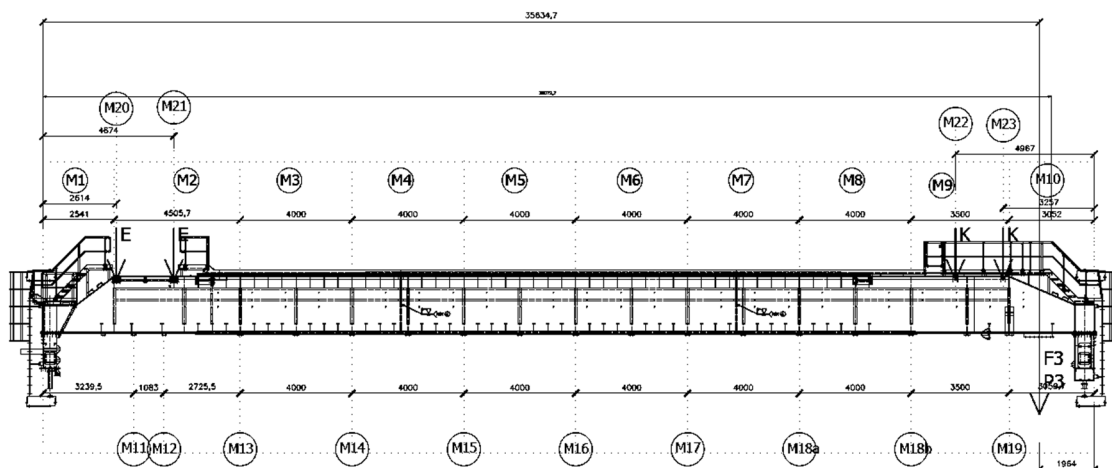
Obr. 135: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní rozrušovací poloha brány P2



Obr. 136: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní rozrušovací poloha brány P3

B) Ruční určení příčných setrvačných sil

Veškeré charakteristiky pro dané seismické zatížení se ponechají totožné jako v prvním způsobu zadávání seismicity. Konstrukce se rozdělí na dílčí segmenty, pro které se určí reprezentativní hmoty pro dynamický výpočet.



Obr. 137: Rozdělení konstrukce na dílčí segmenty pro určení příslušných hmot

Hmoty byly stanoveny ze skořepinového modelu nosníku a z reakcí konstrukce pro vyhrnovací řetěz, vozík a ze zatížení stálého pro polohu vozíku na nosníku s označením P1. Pro rovnoměrně rozloženou tíhu na konstrukci se předpokládá zachování mechanické energie dílčích částí a na základě tohoto předpokladu je stanovena náhradní hmota pro konstrukci.

Hmoty z vlastní tíhy nosníku

$$M_1 = 3389 \text{ kg}$$

$$M_2 = 5654 \text{ kg}$$

$$M_3 = 5488 \text{ kg}$$

$$M_4 = 5487 \text{ kg}$$

$$M_5 = 5487 \text{ kg}$$

$$M_6 = 5487 \text{ kg}$$

$$M_7 = 5487 \text{ kg}$$

$$M_8 = 5266 \text{ kg}$$

$$M_9 = 4115 \text{ kg}$$

$$M_{10} = 4267 \text{ kg}$$

Hmoty z reakcí od vyhrnovacího řetězu

$$M_{1,k} = 1358 \text{ kg}$$

$$M_{2,k} = 812 \text{ kg}$$

$$M_{3,k} = 3148 \text{ kg}$$

$$M_{4,k} = 3384 \text{ kg}$$

$$M_{5,k} = 2680 \text{ kg}$$

$$M_{6,k} = 2878 \text{ kg}$$

$$M_{7,k} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{8-15,k} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{16,k} = 2890 \text{ kg}$$

$$M_{17,k} = 2750 \text{ kg}$$

$$M_{18,k} = 1224 \text{ kg}$$

Hmoty z reakcí od vozíku

$$M_{1,v} = 7459 \text{ kg}$$

$$M_{2,v} = 7459 \text{ kg}$$

Hmoty od technologie

$$M_{kabina} = 1000 \text{ kg}$$

$$M_{rozvodna} = 5000 \text{ kg}$$

$$M_{výsypka} = 2000 \text{ kg}$$

Hmoty celkem

$$M_1 = \frac{3389}{2} + 1358 = 3052,5 \text{ kg}$$

$$M_2 = \frac{5654}{2} = 2827 \text{ kg}$$

$$M_3 = \frac{5488}{2} + 2680 = 5424 \text{ kg}$$

$$M_4 = \frac{5487}{2} + 2848 = 5591,5 \text{ kg}$$

$$M_5 = \frac{5487}{2} + 2848 = 5591,5 \text{ kg}$$

$$M_6 = \frac{5487}{2} + 2848 = 5591,5 \text{ kg}$$

$$M_7 = \frac{5487}{2} + 2848 = 5591,5 \text{ kg}$$

$$M_8 = \frac{5266}{2} + 2848 = 5481 \text{ kg}$$

$$M_9 = \frac{4115}{2} + 2750 = 4807,5 \text{ kg}$$

$$M_{10} = \frac{4267}{2} = 2133,5 \text{ kg}$$

$$M_{11} = 812 \text{ kg}$$

$$M_{12} = 3148 \text{ kg}$$

$$M_{13} = 2680 \text{ kg}$$

$$M_{14} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{15} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{16} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{17} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{18a} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{18b} = 2848 \text{ kg}$$

$$M_{19} = 1224 \text{ kg}$$

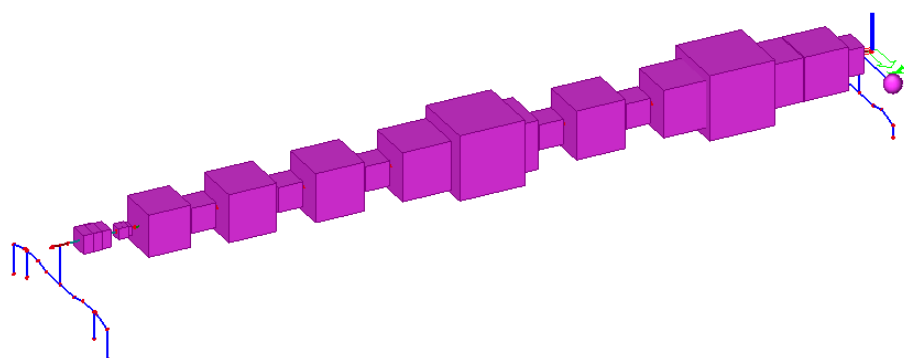
$$M_{20} = 5000 \text{ kg}$$

$$M_{21} = 5000 \text{ kg}$$

$$M_{22} = 1000 \text{ kg}$$

$$M_{23} = 1000 \text{ kg}$$

$$M_{24} = 2000 \text{ kg}$$



Obr. 138: Hmoty na konstrukci dle ručního výpočtu pro jednotlivé segmenty

C) Stanovení posunu hmot v základním tvaru kmitání

Nejprve byla provedena modální analýza pro konstrukci s automaticky vygenerovanými hmotami pomocí funkce software Scia Engineer a stanovil se rozhodující vlastní tvar.

Vlastní tvar 1

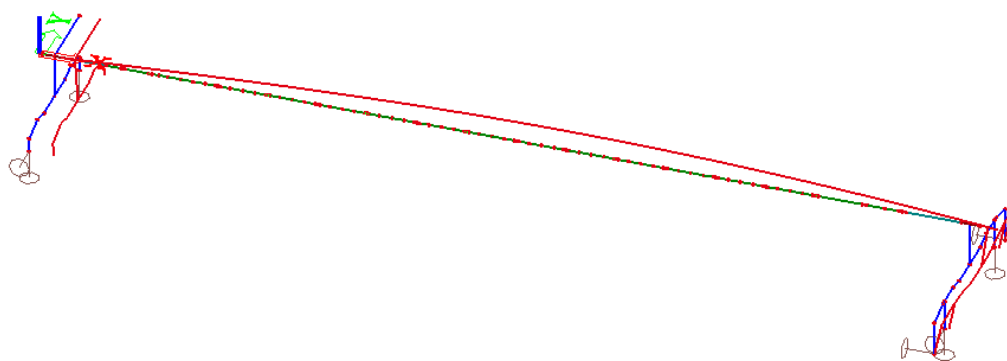
První vlastní tvar zobrazuje konstrukci a její vybočení v rovině XZ, jelikož je pro seismicitu předpokladem kmitání konstrukce v rovině XY, je tento vlastní tvar konstrukce nevhodný pro stanovení příčných sil od seismicity.

$$f = 2,63 \text{ Hz}$$

Vlastní frekvence

N	f [Hz]	omega [1/s]	omega ² [1/s ²]	T [s]
Kombinace hmot : CM1				
1	2,63	16,54	273,61	0,38
2	3,87	24,31	590,82	0,26
3	4,18	26,26	689,47	0,24
4	11,43	71,83	5159,02	0,09

Tab. 13: Výstup ze software Scia Engineer – vlastní frekvence



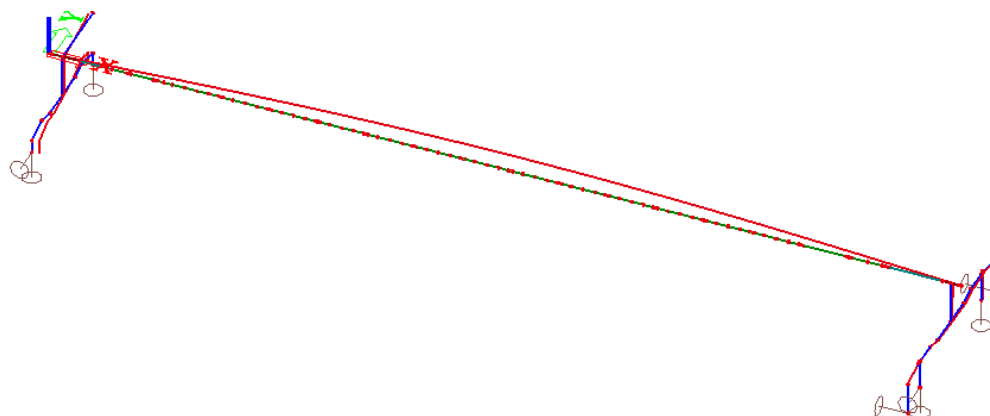
Obr. 139: Deformovaná konstrukce pro 1. vlastní tvar

Vlastní tvar 2

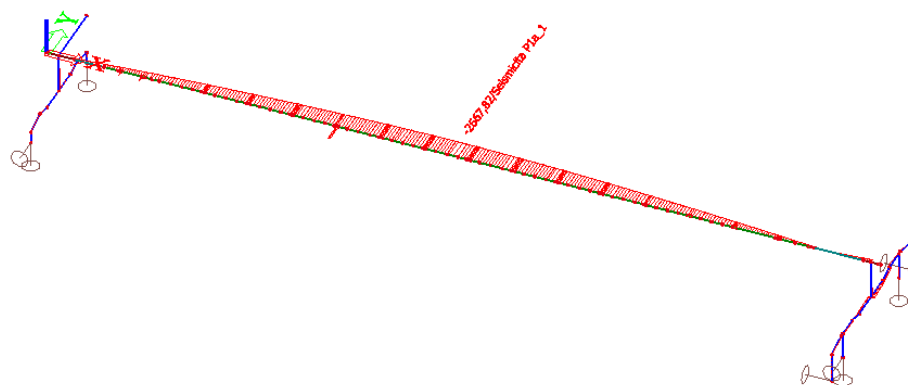
Tento vlastní tvar představuje kmitání v rovině XY a je to rozhodující vlastní tvar pro stanovení zatížení zemětřesením na konstrukci.

$$f = 3,87 \text{ Hz}$$

$$M_z = 2,640 \text{ MNm}$$



Obr. 140: Deformovaná konstrukce pro 2. vlastní tvar



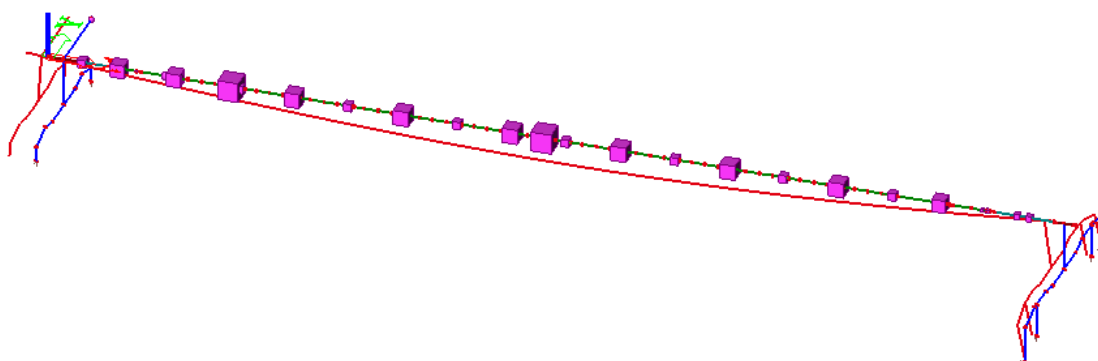
Obr. 141: Průběh ohybové momentu od seizmického zatížení

Poté se stanovily vlastní tvary pro ručně stanovené hmoty na nosníku shrnovače.

Vlastní tvar 1

První vlastní tvar zobrazuje konstrukci a její vybočení v rovině XZ, jelikož je pro seismicitu předpokladem kmitání konstrukce v rovině XY je tento vlastní tvar konstrukce nevhodný pro stanovení příčných sil od seismicity.

$$f = 2,08 \text{ Hz}$$



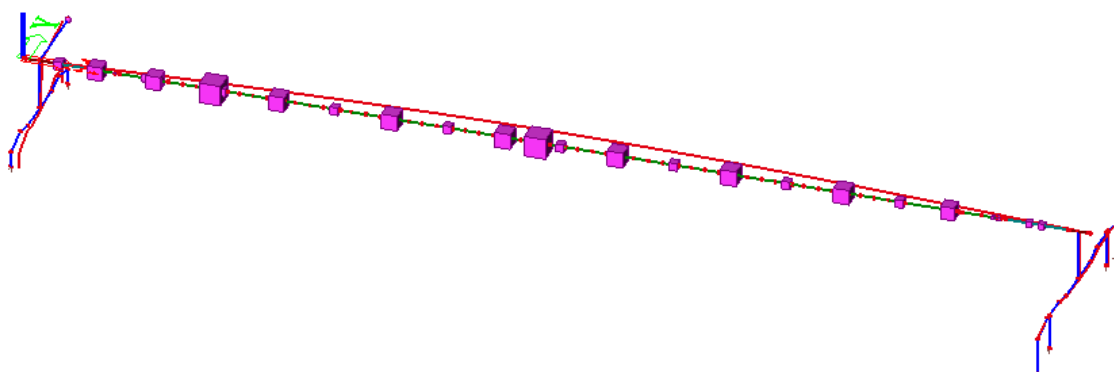
Obr. 142: Deformovaná konstrukce pro 1. vlastní tvar

Vlastní tvar 2

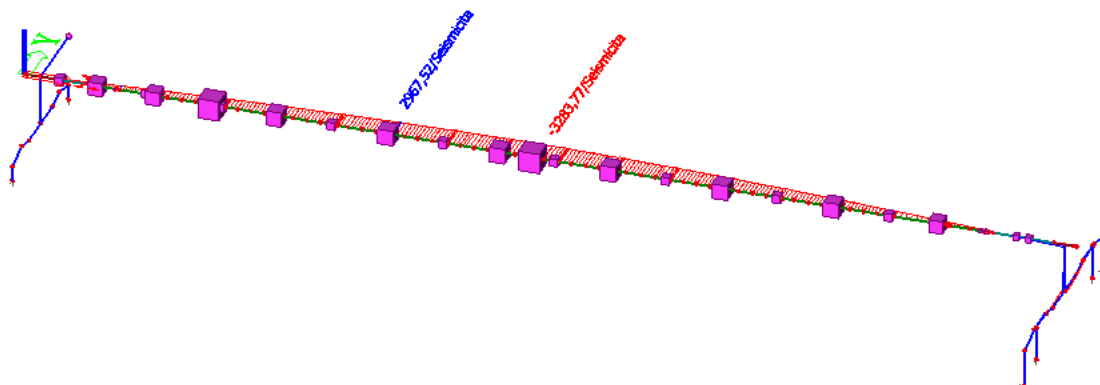
Tento vlastní tvar představuje kmitání v rovině XY a je to rozhodující vlastní tvar pro stanovení zatížení zemětřesením na konstrukci.

$$f = 2,98 \text{ Hz}$$

$$M_z = 3,280 \text{ MNm}$$



Obr. 143: Deformovaná konstrukce pro 2. vlastní tvar



Obr. 144: Průběh ohybové momentu od seizmického zatížení

Hodnoty parametrů popisující vodorovné spektrum pružné odezvy Typ 1 pro typ základové půdy D

$$S = 1,35$$

$$T_B = 0,20 \text{ s}$$

$$T_C = 0,80 \text{ s}$$

$$T_D = 2,0 \text{ s}$$

Perioda kmitání pro 2. vlastní tvar konstrukce

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2,98} = 0,34 \text{ s}$$

Jelikož je splněna tato podmínka:

$$T_B = 0,20 \text{ s} \leq T = 0,34 \text{ s} \leq T_C = 0,80 \text{ s}$$

Platí pro stanovení hodnoty seizmického zatížení:

$$S_D(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} = 9,81 \cdot 0,3 \cdot 1,35 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 6,622 \text{ m/s}^2$$

Seizmická smyková síla v základu se stanoví podle vztahu:

$$F_B = S_D(T) \cdot m \cdot \lambda = 6,622 \cdot 99961 \cdot 1,00 \cdot 10^{-3} = 661,94 \text{ kN}$$

Reakce svislá od vlastní tíhy konstrukce:

$$R_L = 557,42 \text{ kN}$$

$$R_P = 684,78 \text{ kN}$$

Součinitel tření mezi ocelí a kolejnicí

$$\mu = 0,15$$

Třecí síla

$$T_{\text{ř}L} = \mu \cdot R_L = 0,15 \cdot 557,42 = 83,61 \text{ kN}$$

$$T_{\text{ř}P} = \mu \cdot R_P = 0,15 \cdot 684,78 = 102,72 \text{ kN}$$

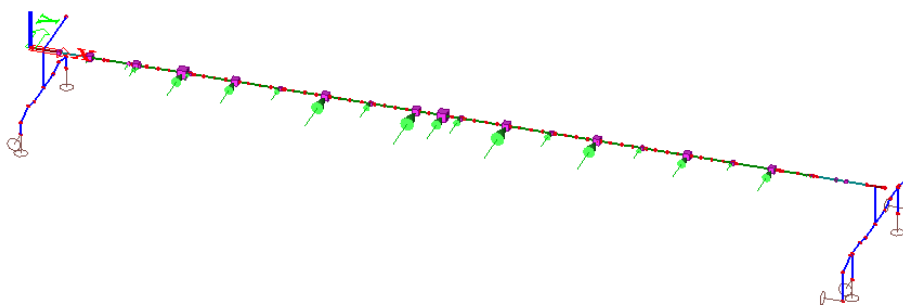
Reakce vodorovná

$$\sum R_P = 186,33 \text{ kN} \leq F_B = 661,94 \text{ kN}$$

Vodorovná reakce je malá vzhledem ke smykové síle v základu, proto je rozdělení příčných sil uvažováno pro smykovou sílu.

V software Microsoft Excel byla vytvořena tabulka, která usnadní výpočet příčných sil pomocí spektra odezvy Typ 1 kombinaci S1_1. Hodnota této smykové síly se pro jednotlivé hmoty rozloží podle vzorce v závislosti na hmotě a poměrné deformace odpovídající vlastní tvaru, hodnoty příslušící jednotlivým hmotám jsou zobrazeny v tabulce č. 14.

Hodnoty příčných sil byly zavedeny do aplikace Scia Engineer jako nový zatěžovací stav a pro porovnání s výpočtem pomocí generátoru ve Scia Engineer byl pro tento stav proveden lineární výpočet a stanovení vnitřních sil.



Obr. 145: Příčné síly od zemětřesení

Hmot	Popis	Hmotnost [kg]	Pozice hmoty ve směru osy x [mm]	Deformace uzlu uy [mm]	Základní tvar	$\sum m_i \cdot s_i^2$	$\sum m_i \cdot s_i$	$F_i = F_0 \frac{m_i \cdot s_i}{\sum m_i \cdot s_i}$
M1	Vlastní tíha	3052,5	1270	366,71	1,000	3052,5	3052,5	7736,42
M2	Vlastní tíha	2827	4794	329,18	0,898	2278,0	2537,7	6431,65
M3	Vlastní tíha	5424	9047	283,28	0,772	3236,7	4190,0	10619,30
M4	Vlastní tíha	5591,5	13047	240,44	0,656	2403,7	3666,1	9291,59
M5	Vlastní tíha	5591,5	17047	198,04	0,540	1630,7	3019,7	7653,18
M6	Vlastní tíha	5591,5	21047	156,34	0,426	1016,2	2383,8	6041,54
M7	Vlastní tíha	5591,5	25047	115,63	0,315	555,9	1763,1	4468,40
M8	Vlastní tíha	5481	29047	76,24	0,208	236,9	1139,5	2888,04
M9	Vlastní tíha	4807,5	32797	40,20	0,110	57,8	527,0	1335,69
M10	Vlastní tíha	2133,5	36073	15,00	0,041	3,6	87,3	221,18
M11	Konstrukce řetězu	812	3240	345,50	0,942	720,8	765,0	1938,94
M12	Konstrukce řetězu	3148	4323	333,79	0,910	2608,2	2865,4	7262,21
M13	Konstrukce řetězu	2680	7048,5	304,80	0,831	1851,4	2227,5	5645,51
M14	Konstrukce řetězu	2848	11048,5	261,82	0,714	1451,7	2033,4	5153,43
M15	Konstrukce řetězu	2848	15048,5	219,17	0,598	1017,3	1702,1	4313,96
M16	Konstrukce řetězu	2848	19048,5	177,08	0,483	664,1	1375,3	3485,54
M17	Konstrukce řetězu	2848	23048,5	135,84	0,370	390,8	1055,0	2673,80
M18a	Konstrukce řetězu	2848	27048,5	95,75	0,261	194,2	743,5	1884,69
M18b	Konstrukce řetězu	2848	31048,5	51,16	0,140	55,4	397,3	1007,06
M19	Konstrukce řetězu	1224	34548	25,00	0,068	5,7	83,4	211,49
M20	Rozvodna	5000	2614	352,19	0,960	4611,8	4802,0	12170,44
M21	Rozvodna	5000	4674	330,00	0,900	4049,0	4499,5	11403,66
M22	Kabina	1000	32632	44,00	0,120	14,4	120,0	304,10
M23	Kabina	1000	34342	27,00	0,074	5,4	73,6	186,61
M24	Výsypka	2000	35635	16,00	0,044	3,8	87,3	221,16
M25	Vozík	7459	6734	305,00	0,832	5159,8	6203,8	15723,20
M26	Vozík	7459	18242	183,00	0,499	1857,5	3722,3	9433,92
		99961,50 kg				39133,4	55125,0	139706,69 N

Frekvence 0,36 Hz
 Perioda 2,75 s
 Spektrum podloží 1,398
 0,785
 Seismická smyková síla v základu
 F_s 139706,69 N

Tab. 14: Rozdělení smykové síly do míst jednotlivých hmot

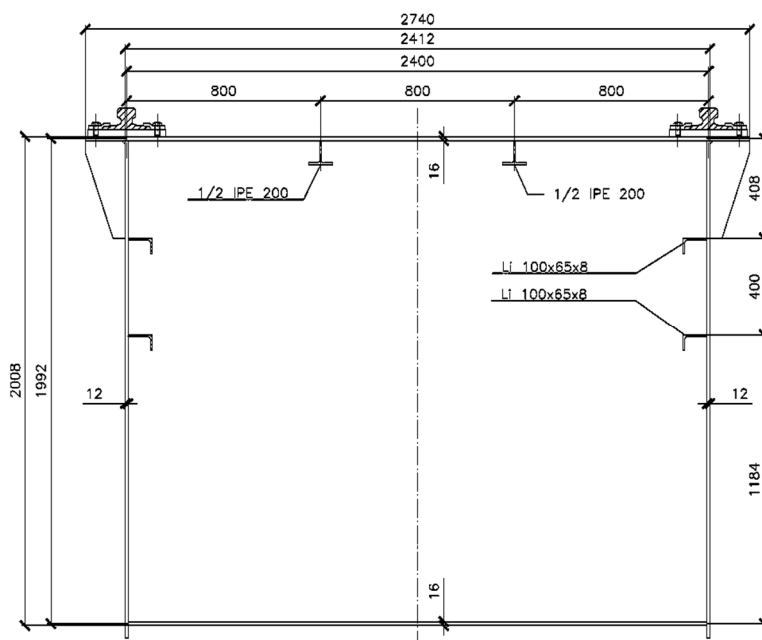
D) Srovnání výsledků obou metod

Hodnoty ohybových momentů se liší cca o 20 % což lze přisoudit nerovnoměrnému rozdělení hmot po konstrukci ručním výpočtem. Tento způsob zadání seismicity je možný, ale pro tento případ, kde se uvažuje se dvěma spektry odezvy, se pro stanovení maximálních vnitřních sil pro posudek průřezu využije seismický výpočet uvedený v bodě A. Smyková síla v základu byla analyticky stanovena na hodnotu 661 kN a dle software Scia Engineer a jeho seismického výpočtu by hodnota měla narůst na 515,6 kN, rozdíl je způsobem odlišným rozdělením hmot konstrukce.

V souladu s kombinačními předpisy v ČSN 27 7008 byly v software Scia Engineer upraveny součinitele kombinační a jednotlivé dílčí součinitele pro zatížení stálá a proměnná. Kombinace byly provedeny s použitím mimořádného kombinačního pravidla (pro zatěžovací stav náraz vozíku a seismicity) a pravidla Soubor B (pro provozní stav konstrukce).

7.3 Návrh a posudek hlavního uzavřeného nosníku

Nosník je z oceli jakosti S355, je vyztužený příčnými výztuhami (v poli nosníku po vzdálenosti 2,00 m) a podélnými výztuhami tvořenými profilem Li 100x65x8 a 1/2 IPE 200. Základní geometrie průřezu mimo příčnou výztuhu uprostřed nosníku je zobrazena na obrázku č. 141.



Obr. 146: Geometrie uzavřeného průřezu

Zatřídění průřezu

Ohýbaná část

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$\frac{2412-2 \cdot 12}{16} = 149,25 \geq 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89 \quad \textbf{Nesplněno} - \text{průřez třídy 4}$$

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{2412-2 \cdot 12}{16} = 149,26 \geq 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17 \quad \textbf{Nesplněno} - \text{průřez třídy 4}$$

Přečnávající část horní pásnice

Tlačená část

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$$

$$\frac{164}{16} = 10,25 \leq 14 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 11,39 \quad \textbf{Splněno} - \text{průřez třídy 3}$$

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,10127 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 935 \text{ mm}$$

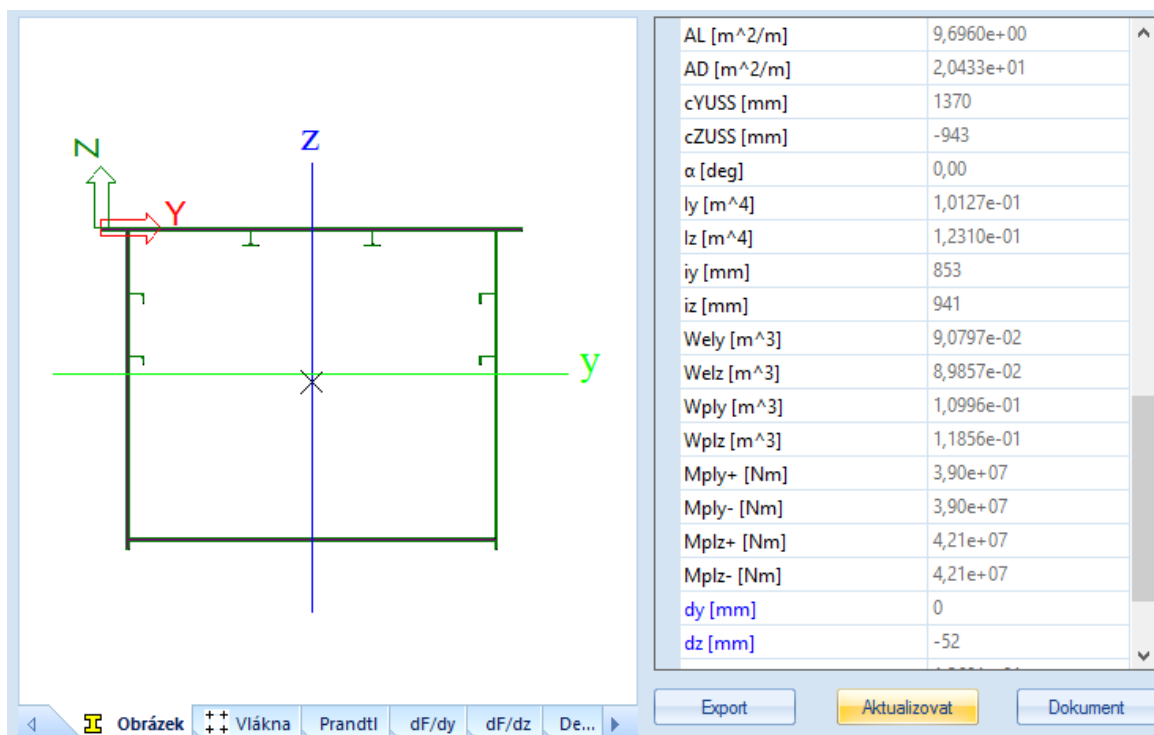
$$h_{bottom} = 1992 - 935 = 1057 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,10127}{0,935} = 0,1083 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,10127}{1,057} = 0,0958 \text{ m}^3$$

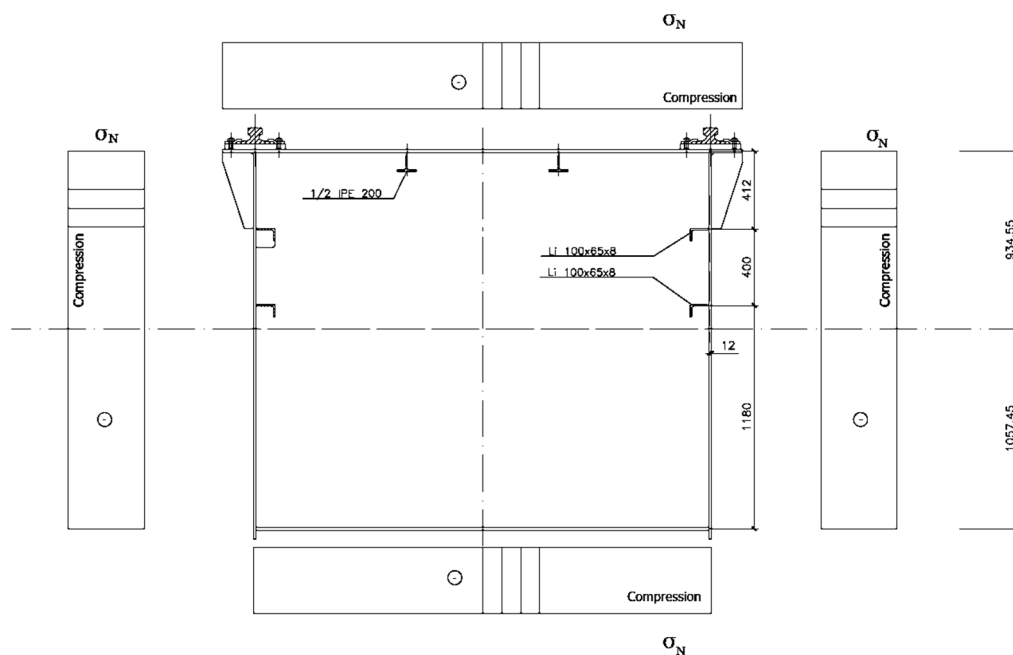
Jelikož se jedná o průřez třídy 4, je zapotřebí stanovit efektivní charakteristiky průřezu, v níž dochází k vyloučení částí průřezu, které mohou být porušeny lokálním bolením především tedy v tlačených oblastech průřezu. Efektivní účinné charakteristiky jsou stanoveny v souladu s normou ČSN EN 1993-5 počínaje horní pásnicí průřezu, u které se při namáhání ohybovým momentem

předpokládá zatížení tlakem. Pro jednotlivé části, to je tlačaná horní pásnice a ohýbané stěny průřezu, jsou stanoveny průřezové charakteristiky samostatně.

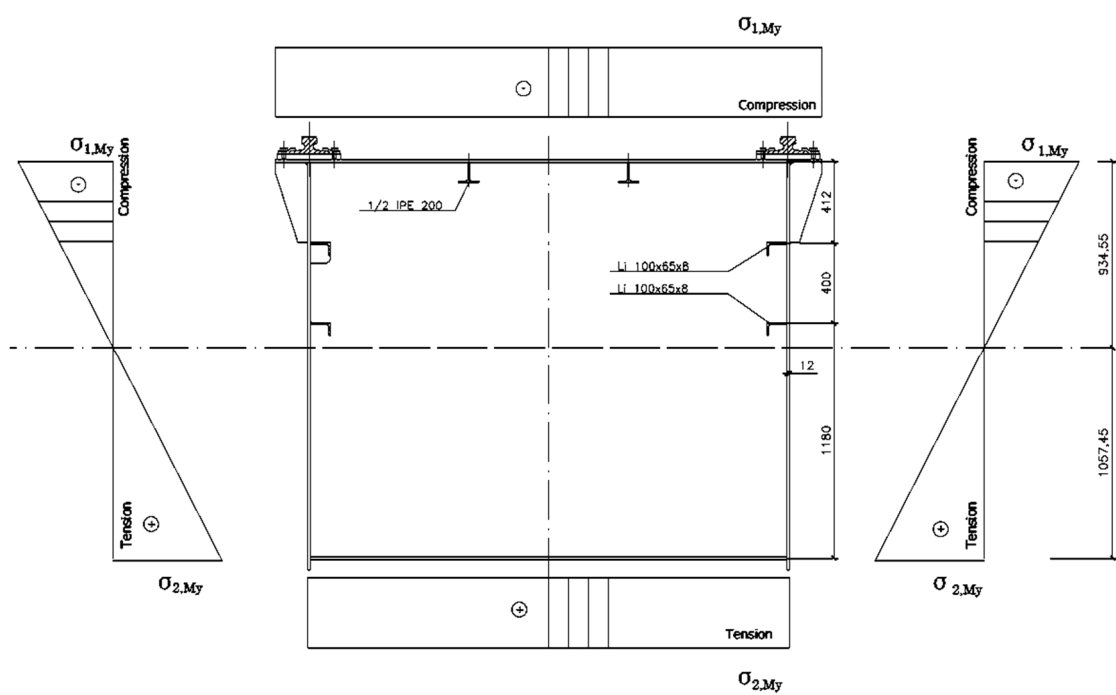


Obr. 147: Importovaný průřez

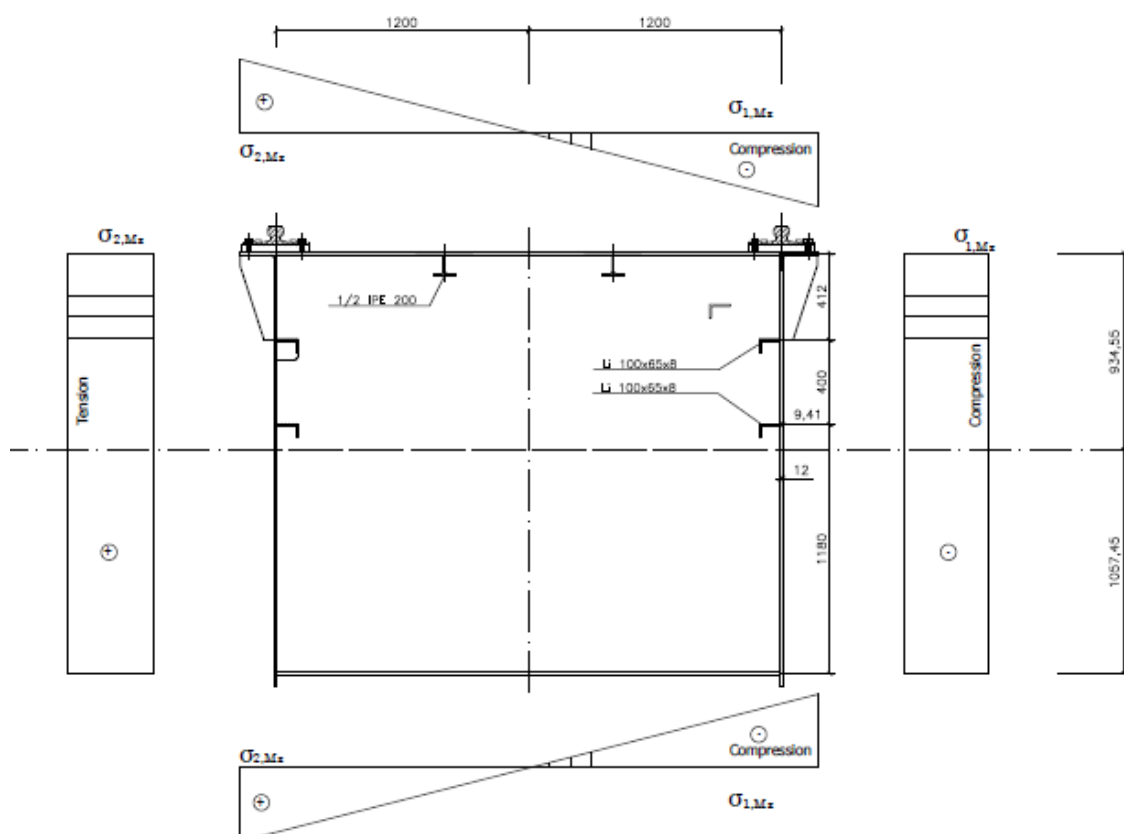
Posudek je proveden v souladu s [10], [3]. Maximální vnitřní síly jsou stanoveny pomocí globální statické analýzy v software Scia Engineer, lineárním výpočtem z důvodu výskytu seismického zatížení v zatěžovacích stavech.



Obr. 148: Průběh normálového napětí od normálové síly N



Obr. 149: Průběh normálového napětí od ohybového momentu M_y



Obr. 150: Průběh normálového napětí od ohybového momentu M_z

7.3.1 Minimální požadavky na podélné výztuhy

Aby nedocházelo k vybočení podélných výztuh a pokud není provedena analýza k zabránění výztuh s otevřeným průřezem zkroucením, musí být splněno kritérium pro přibližné posouzení:

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} \quad (2)$$

kde I_T je moment v prostém kroucení pro samostatnou výztuhu a I_p je polární moment setrvačnosti samotné výztuhy.

Případně kritérium zpřesňující s ohledem na pružné kritické napětí pro vybočení zkroucením bez uvažování rotačního podepření stěnou:

$$\sigma_{cr} \geq \theta f_y \quad (3)$$

kde hodnota součinitele θ je stanovena národní přílohou.

Posouzení podélné výztuhy ½ IPE200

Zatřídění podélných výztuh

Stojina průřezu ½ IPE200

$$\frac{c}{t} = \frac{104}{5,6} = 18,57 \leq 33\varepsilon = 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Třída průřezu 1

Pásnice ½ IPE200

$$\frac{c}{t} = \frac{50}{8,0} = 6,25 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Třída průřezu 1

Průřezové charakteristiky výztuhy:

$$A_{sl} = 1,492 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momenty setrvačnosti výztuhy k místu připojení výztuhy ke stěně průřezu:

$$I_{z,sl} = \frac{1}{12} 0,0085 \cdot 0,10^3 + \frac{1}{12} 0,0056^3 \cdot (0,10 - 0,0085) = 7,097 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{y,sl} = \frac{1}{12} 0,0085^3 \cdot 0,10 + \frac{1}{12} 0,0056 \cdot (0,10 - 0,0085)^3 + 0,0056 \cdot (0,1 - 0,0085) \cdot \left(\frac{0,1 - 0,0085}{2}\right)^2 + 0,1 \cdot 0,0085 \cdot \left(\frac{0,0085}{2} + 0,1 - 0,0085\right)^2 = 9,228 \cdot 10^{-6} m^4$$

$$I_{p,sl} = I_{y,sl} + I_{z,sl} = 9,228 \cdot 10^{-6} + 7,097 \cdot 10^{-7} = 9,938 \cdot 10^{-6} m^4$$

$$I_{t,sl} = \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (b_{sl} + h_{sl} - t_{sl}) t_{sl}^3 = \frac{1}{3} ((0,1 - 0,0085) \cdot 0,0056^3 + 0,1 \cdot 0,0085^3) = 2,583 \cdot 10^{-8} m^4$$

Posouzení kritéria zabránění vybočení výztuhy zkroucením:

$$\frac{I_T}{I_p} = \frac{2,583 \cdot 10^{-8}}{9,938 \cdot 10^{-6}} = 2,60 \cdot 10^{-3} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{355}{210 \cdot 10^3} = 8,96 \cdot 10^{-3}$$

Přibližné posouzení není splněno, provede se posouzení zpřesňující s ohledem na hodnotu kritického napětí výztuhy v kroucení.

Hlavní výsečová plocha (vztaženo ke střednici výztuhy):

$$w = \left(h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}\right) \cdot \frac{b_{sl}}{2} = \left(0,1 - \frac{0,0085}{2}\right) \cdot \frac{0,1}{2} = 4,788 \cdot 10^{-3} m^2$$

Výsečový moment pro střed smyku v místě připojení ke stěně nosníku:

$$I_w = \int_A w^2 dA = 2 \int_0^{h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}} \left(\frac{\left(h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}\right) \cdot \frac{b_{sl}}{2}}{\left(h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}\right)}\right)^2 y^2 t dy$$

$$I_w = \int_A w^2 dA = 2 \int_0^{h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}} \left(\frac{b_{sl}}{2}\right)^2 y^2 t dy = 2 \left(\frac{b_{sl}}{2}\right)^2 t \left[\frac{y^3}{3}\right] =$$

$$= 2 \left(\frac{b_{sl}}{2}\right)^2 t \left[\frac{\left(h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}\right)^3}{3}\right] = \frac{2}{3} \left(\frac{b_{sl}}{2}\right)^2 \left(h_{sl} - \frac{t_{sl,f}}{2}\right)^3 \cdot t =$$

$$= \frac{2}{3} \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 \left(0,1 - \frac{0,0085}{2}\right)^3 \cdot 0,0085 = \frac{2}{3} \left(\left(\frac{0,1}{2}\right) \left(0,1 - \frac{0,0085}{2}\right)\right)^2 \left(0,1 - \frac{0,0085}{2}\right) \cdot 0,0085$$

$$= 1,244 \cdot 10^{-8} m^6$$

Pružné kritické napětí pro vybočení zkroucením bez tuhosti stojiny v kroucení:

$$\begin{aligned}\sigma_{cr} &= \frac{1}{I_p} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{a^2} \right) = \\ &= \frac{1}{9,938 \cdot 10^{-6}} \left(81 \cdot 10^9 \cdot 2,583 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 1,244 \cdot 10^{-8}}{2,0^2} \right) = \\ &= 859,13 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \\ \sigma_{cr} &= 859,13 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \leq 6 \cdot f_y = 6 \cdot 355 \cdot 10^6 = 2130 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

Podmínka není splněna, do výpočtu kritického pružného napětí při vybočení výztuhy zkroucením je vhodné zahrnout torzní tuhost pásnice nosníku.

Pro posuzovanou výztuhu přibližně platí:

$$c_\theta \approx \frac{E t_w^3}{3b} = \frac{210\,000 \cdot 16^3}{3 \cdot 2000} = 143360 \text{ N}$$

Kritické pružné napětí se pak stanoví dle vztahu:

$$\begin{aligned}\sigma_{cr} &= \frac{1}{I_p} \left(2\sqrt{c_\theta E I_w} + G I_t \right) = \\ &= \frac{1}{9,938 \cdot 10^{-6}} \left(2\sqrt{143360 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 1,244 \cdot 10^{-8}} + 81 \cdot 10^9 \cdot 2,583 \cdot 10^{-8} \right) = \\ &= 4105,14 \cdot 10^6 \text{ Pa} \\ \sigma_{cr} &= 4105,14 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \geq 6 \cdot f_y = 6 \cdot 355 \cdot 10^6 = 2130 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

Požadavek na minimální tuhost v kroucení podélné výztuhy pásnice je splněn.

Posouzení podélné výztuhy Li 100x65x8

Vnitřní část průřezu Li 100x65x8

$$\frac{c}{t} = \frac{100}{8} = 12,50 \leq 33\varepsilon = 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Třída průřezu 1

Přečnickující část průřezu Li 100x65x8

$$\frac{c}{t} = \frac{65}{8,0} = 8,125 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Třída průřezu 1

Průřezové charakteristiky výztuhy

$$A_{sl} = 1,256 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momenty setrvačnosti výztuhy k místu připojení výztuhy ke stěně průřezu:

$$\begin{aligned} I_{z,sl} &= \frac{1}{12} 0,008 \cdot 0,1^3 + \frac{1}{12} 0,008^3 (0,065 - 0,008) + 0,008 \\ &\quad \cdot (0,065 - 0,008) \left(0,1 - \frac{0,008}{2}\right)^2 + 0,1 \cdot 0,008 \cdot \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 \\ &= 6,67 \cdot 10^{-7} + 2,432 \cdot 10^{-9} + 4,202 \cdot 10^{-6} + 2,0 \cdot 10^{-6} \\ &= 6,871 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{y,sl} &= \frac{1}{12} 0,008^3 \cdot 0,1 + \frac{1}{12} 0,008 (0,065 - 0,008)^3 + 0,008 \\ &\quad \cdot (0,065 - 0,008) \left(\frac{0,065 - 0,008}{2} + 0,004\right)^2 \\ &= 4,27 \cdot 10^{-9} + 1,235 \cdot 10^{-7} + 4,82 \cdot 10^{-7} = 6,10 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{t,sl} &= \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (b_{sl} + h_{sl} - t_{sl}) t_{sl}^3 = \frac{1}{3} (0,1 + 0,065 - 0,008) 0,008^3 = \\ &= 2,679 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$I_{p,sl} = I_{y,sl} + I_{z,sl} = 6,871 \cdot 10^{-6} + 6,10 \cdot 10^{-7} = 7,481 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Posouzení kritéria zabránění vybočení výztuhy zkroucením (se zanedbáním ohybové tuhosti v kroucení):

$$\frac{I_T}{I_p} = \frac{2,679 \cdot 10^{-8}}{7,481 \cdot 10^{-6}} = 3,58 \cdot 10^{-3} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{355}{210 \cdot 10^3} = 8,96 \cdot 10^{-3}$$

Přibližné posouzení není splněno, provede se posouzení zpřesňující s ohledem na hodnotu kritického napětí výztuhy v kroucení.

Hlavní výsečová plocha:

$$w = \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right) \cdot \quad (4)$$

Výsečový moment pro střed smyku v místě připojení ke stěně nosníku:

$$I_w = \int_A w^2 dA = \int_0^{h_{sl}} \left(\frac{\left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right) \cdot h_{sl}}{h_{sl}} \right)^2 y^2 t dy$$

$$I_w = \int_A w^2 dA = \int_0^{h_{sl}} \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right)^2 y^2 t dy = \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right)^2 t \left[\frac{y^3}{3}\right] = \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right)^2 t \left[\frac{h_{sl}^3}{3}\right] =$$

$$\frac{1}{3} \left(b_{sl} - \frac{t_{sl}}{2}\right)^2 h_{sl}^3 \cdot t = \frac{1}{3} \left(0,1 - \frac{0,008}{2}\right)^2 0,065^3 \cdot 0,008 = 6,75 \cdot 10^{-9} m^6$$

Pružné kritické napětí pro vybočení zkroucením bez tuhosti stojiny v kroucení:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{a^2} \right) =$$

$$= \frac{1}{7,481 \cdot 10^{-6}} \left(81 \cdot 10^9 \cdot 2,679 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 6,75 \cdot 10^{-9}}{2,0^2} \right) =$$

$$= 1034 \cdot 10^6 N/m^2$$

$$\sigma_{cr} = 757,59 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \leq 6 \cdot f_y = 6 \cdot 355 \cdot 10^6 = 2130 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Podmínka není splněna, do výpočtu kritického pružného napětí při vybočení výztuhy zkroucením je vhodné zahrnout torzní tuhost stěny nosníku. Kritické pružné napětí se pak stanoví dle vztahu:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} \left(E I_w \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{c_\theta a^2}{m^2 \pi^2} + G I_t \right) \quad (5)$$

kde m představuje počet sinusových polovin vybočení výztuhy a při počtu $m=1$ získáme minimální hodnotu kritického pružného napětí dle vzorce:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{I_p} (2\sqrt{c_\theta E I_w} + G I_t). \quad (6)$$

Pro posuzovanou výztuhu přibližně platí:

$$c_\theta \approx \frac{E t_w^3}{3b} = \frac{210\,000 \cdot 12^3}{3 \cdot 2000} = 60480 N$$

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{7,481 \cdot 10^{-6}} \left(2\sqrt{60480 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 6,75 \cdot 10^{-9}} + 81 \cdot 10^9 \cdot 2,679 \cdot 10^{-8} \right) =$$

$$= 3775 \cdot 10^6 Pa$$

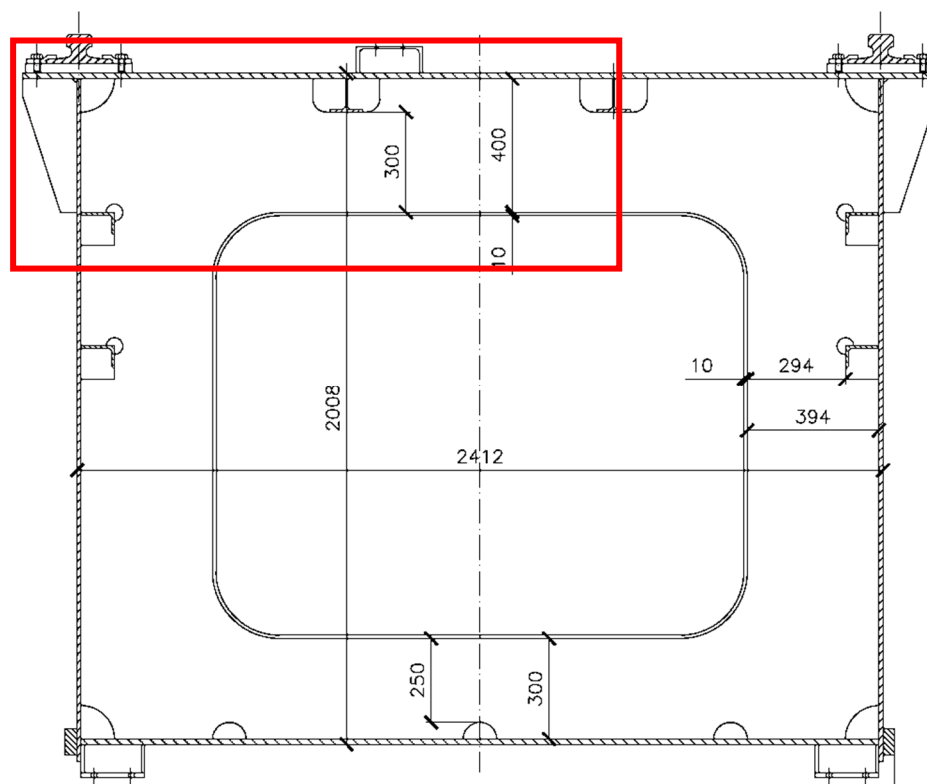
$$\sigma_{cr} = 2765,42 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \geq 6 \cdot f_y = 6 \cdot 355 \cdot 10^6 = 2130 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Požadavek na minimální tuhost v kroucení podélné výztuhy stěny je splněn.

7.3.2 Minimální požadavky na příčné výztuhy

Střední příčné výztuhy jsou kontrolovány v místě uzavřeného komorového průřezu ve střední části nosníku. Délky výztuhy v místě horní a dolní pásnice a stěny jsou odlišných geometrických vlastností, proto jsou posouzeny jednotlivé výztuhy samostatně.

A) Výztuha horní pásnice průřezu



Obr. 151: Posuzovaná výztuha horní pásnice

Zatřídění průřezu

Vnitřní část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{400}{8} = 50 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Třída průřezu 4

Přečnávající část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{50}{10} = 5,00 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Třída průřezu 1

Výztuha je třídy průřezu 4, je zapotřebí stanovit efektivní účinné charakteristiky průřezu pro její posouzení.

Součinitel kritického napětí se stanoví dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5, lze předpokládat, že celá stojina výztuhy v místě tlačného průřezu je rovnoměrně tlačena, poměr napětí je tedy roven 1.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,00$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{400/8}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 1,082$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 1,082 \geq 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda}_{p2} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda}_{p2}^2} = \frac{1,082 - 0,055(3+1)}{1,082^2} = 0,736 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{1,eff} = b_1 \cdot \rho_1 = 400 \cdot 0,736 = 294,4 \text{ mm}$$

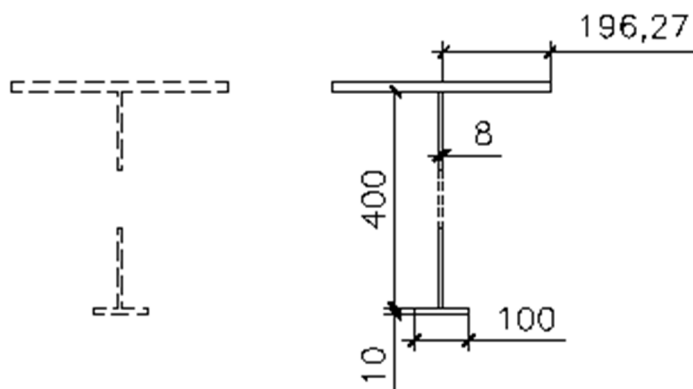
Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 294,4 = 147,20 \text{ mm}$$

Šířka stěny pásnice spolupůsobící s průřezem výztuhy:

$$15\varepsilon t_f = 15 \sqrt{\frac{235}{355}} 16 = 195,27 \text{ mm}$$

Posouzení minimálního momentu setrvačnosti účinného průřezu příčné výztuhy:



Obr. 152: Průřez výztuhy horní pásnice

$$I_{st}' = 8,563 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \text{ (odečteno ze software Scia Engineer)}$$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{2000}{2412} = 0,829 < \sqrt{2}$$

S ohledem na posouzení minimální tuhosti účinného průřezu výztuhy ve smyku musí minimální moment setrvačnosti splňovat rovnici:

$$\begin{aligned} I_{st}' &= 8,563 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \geq 1,5 h_w^3 t^3 \frac{1}{a^2} = 1,5 \cdot 2,412^3 \cdot 0,016^3 \frac{1}{2,0^2} \\ &= 2,155 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Příčná výztuha tvoří tuhou podporu vnitřnímu panelu pásnice průřezu.

Průřezové charakteristiky výztuhy:

$$A_{sl} = 4,200 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momenty setrvačnosti výztuhy k místu připojení výztuhy ke stěně průřezu:

$$I_{z,sl} = \frac{1}{12} 0,01 \cdot 0,10^3 + \frac{1}{12} 0,008^3 \cdot 0,4 = 8,504 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} I_{y,sl} &= \frac{1}{12} 0,01^3 \cdot 0,10 + \frac{1}{12} 0,008 \cdot 0,4^3 + 0,008 \cdot 0,4 \cdot \left(\frac{0,4}{2}\right)^2 + 0,1 \cdot 0,01 \\ &\quad \cdot \left(\frac{0,01}{2} + 0,4\right)^2 = 3,347 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$I_{p,sl} = I_{y,sl} + I_{z,sl} = 8,504 \cdot 10^{-7} + 3,347 \cdot 10^{-4} = 3,356 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

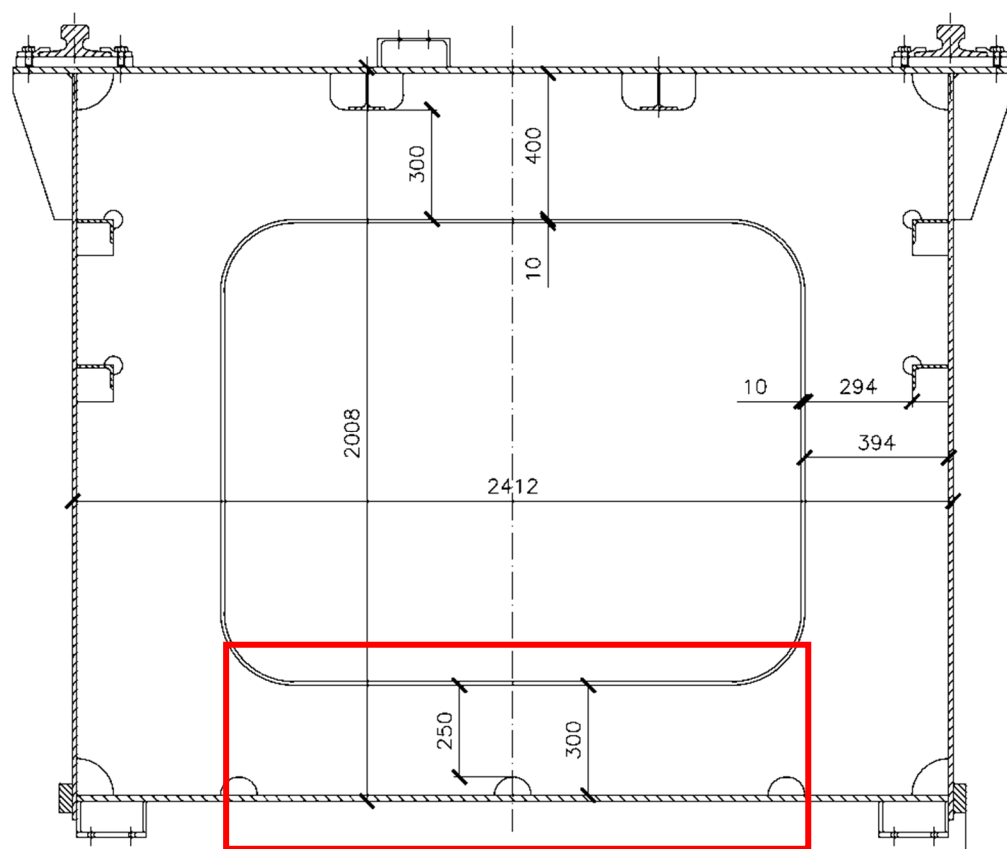
$$I_{t,sl} = \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (b_{sl} + h_{sl} - t_{sl}) t_{sl}^3 = \frac{1}{3} (0,4 \cdot 0,008^3 + 0,1 \cdot 0,01^3) = 1,016 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Posouzení kritéria zabránění vybočení výztuhy zkroucením:

$$\frac{I_T}{I_p} = \frac{1,016 \cdot 10^{-7}}{3,356 \cdot 10^{-6}} = 0,030 \geq 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{355}{210 \cdot 10^3} = 8,96 \cdot 10^{-3}$$

Přibližné posouzení je splněno, předpokládá se dostatečná tuhost výztuhy proti vybočení zkroucením.

B) Výztuha dolní pásnice průřezu



Obr. 153: Posuzovaná výztuha dolní pásnice

Zatřídění průřezu

Vnitřní část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{300}{8} = 37,50 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Třída průřezu 4

Přečnívající část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{50}{10} = 5,00 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

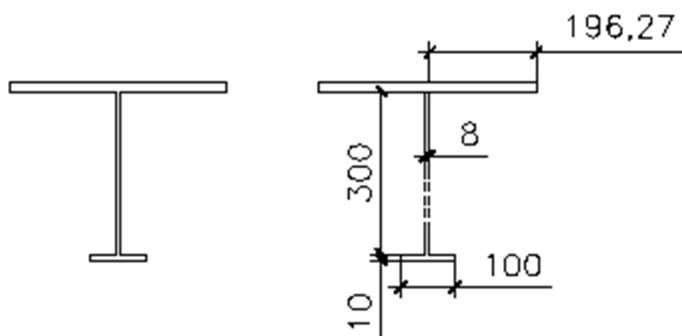
Třída průřezu 1

Výztuha je třídy průřezu 4, ale v dolní části průřezu je výztuha tažená, není potřeba určit efektivní průřezové charakteristiky.

Šířka stěny pásnice spolupůsobící s průřezem výztuhy:

$$15\varepsilon t_f = 15 \sqrt{\frac{235}{355}} 16 = 195,27 \text{ mm}$$

Posouzení minimálního momentu setrvačnosti účinného průřezu příčné výztuhy:



Obr. 154: Průřez výztuhy dolní pásnice

$$I_{st}' = 8,653 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \text{ (odečteno ze software Scia Engineer)}$$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{2000}{2412} = 0,829 < \sqrt{2}$$

S ohledem na posouzení minimální tuhosti účinného průřezu výztuhy ve smyku musí minimální moment setrvačnosti splňovat rovnici:

$$I_{st}' = 8,563 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \geq 1,5 h_w^3 t^3 \frac{1}{a^2} = 1,5 \cdot 2,412^3 \cdot 0,016^3 \frac{1}{2,0^2} =$$

$$= 2,155 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Příčná výztuha tvoří tuhou podporu vnitřnímu panelu dolní pásnice průřezu.

Průřezové charakteristiky výztuhy:

$$A_{sl} = 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momenty setrvačnosti výztuhy k místu připojení výztuhy ke stěně průřezu:

$$I_{z,sl} = \frac{1}{12} 0,01 \cdot 0,10^3 + \frac{1}{12} 0,008^3 \cdot 0,3 = 8,461 \cdot 10^{-7} m^4$$

$$I_{y,sl} = \frac{1}{12} 0,01^3 \cdot 0,10 + \frac{1}{12} 0,008 \cdot 0,3^3 + 0,008 \cdot 0,3 \cdot \left(\frac{0,3}{2}\right)^2 + 0,1 \cdot 0,01 \cdot \left(\frac{0,01}{2} + 0,3\right)^2 = 1,650 \cdot 10^{-4} m^4$$

$$I_{p,sl} = I_{y,sl} + I_{z,sl} = 8,461 \cdot 10^{-7} + 1,650 \cdot 10^{-4} = 1,658 \cdot 10^{-6} m^4$$

$$I_{t,sl} = \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (b_{sl} + h_{sl} - t_{sl}) t_{sl}^3 = \frac{1}{3} (0,3 \cdot 0,008^3 + 0,1 \cdot 0,01^3) = 8,453 \cdot 10^{-8} m^4$$

Posouzení kritéria zabránění vybočení výztuhy zkroucením:

$$\frac{I_T}{I_p} = \frac{8,453 \cdot 10^{-8}}{1,658 \cdot 10^{-6}} = 0,051 \geq 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{355}{210 \cdot 10^3} = 8,96 \cdot 10^{-3}$$

Přibližné posouzení je splněno, předpokládá se dostatečná tuhost výztuhy proti vybočení zkroucením.

C) Výztuha stěny průřezu

Zatřídění průřezu

Vnitřní část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{394}{8} = 49,25 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Třída průřezu 4

Přečnívající část průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{50}{10} = 5,00 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Třída průřezu 1

Výztuha je třídy průřezu 4, je zapotřebí stanovit efektivní účinné charakteristiky průřezu pro její posouzení.

Součinitel kritického napětí se stanoví dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5, lze předpokládat, že celá stojina výztuhy v místě tlačného průřezu je rovnoměrně tlačná, poměr napětí je tedy roven 1.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,00$$

$$\overline{\lambda_{p1}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{394/8}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 1,066$$

$$\overline{\lambda_{p1}} = 1,066 \geq 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda_{p2}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p2}}^2} = \frac{1,066 - 0,055(3+1)}{1,066^2} = 0,745 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{1,eff} = b_1 \cdot \rho_1 = 394 \cdot 0,745 = 293,53 \text{ mm}$$

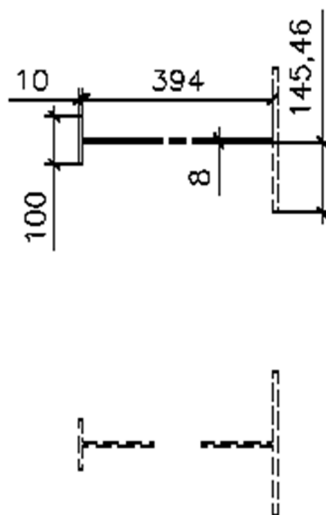
Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 293,53 = 146,77 \text{ mm}$$

Šířka stěny pásnice spolupůsobící s průřezem výztuhy:

$$15\epsilon t_w = 15 \sqrt{\frac{235}{355}} 12 = 146,45 \text{ mm}$$

Posouzení minimálního momentu setrvačnosti účinného průřezu příčné výztuhy:



Obr. 155: Průřez výztuhy stěny průřezu

$$I_{st}' = 2,783 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \text{ (odečteno ze software Scia Engineer)}$$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{2000}{2008} = 0,996 < \sqrt{2}$$

S ohledem na posouzení minimální tuhosti účinného průřezu výztuhy ve smyku musí minimální moment setrvačnosti splňovat rovnici:

$$I'_{st} = 2,783 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \geq 1,5 h_w^3 t^3 \frac{1}{a^2} = 1,5 \cdot 2,008^3 \cdot 0,012^3 \frac{1}{2,0^2} =$$

$$= 5,246 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Příčná výztuha tvoří tuhou podporu vnitřnímu panelu stojiny průřezu.

Průřezové charakteristiky výztuhy:

$$A_{sl} = 4,152 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Momenty setrvačnosti výztuhy k místu připojení výztuhy ke stěně průřezu:

$$I_{z,sl} = \frac{1}{12} 0,01 \cdot 0,10^3 + \frac{1}{12} 0,008^3 \cdot 0,394 = 8,501 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I_{y,sl} = \frac{1}{12} 0,01^3 \cdot 0,10 + \frac{1}{12} 0,008 \cdot 0,4^3 + 0,008 \cdot 0,394 \cdot \left(\frac{0,394}{2}\right)^2 + 0,1 \cdot 0,01$$

$$\cdot \left(\frac{0,01}{2} + 0,394\right)^2 = 3,242 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$I_{p,sl} = I_{y,sl} + I_{z,sl} = 8,501 \cdot 10^{-7} + 3,242 \cdot 10^{-4} = 3,251 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{t,sl} = \frac{1}{3} \sum_i b_i t_i^3 = \frac{1}{3} (b_{sl} + h_{sl} - t_{sl}) t_{sl}^3 = \frac{1}{3} (0,394 \cdot 0,008^3 + 0,1 \cdot 0,01^3) =$$

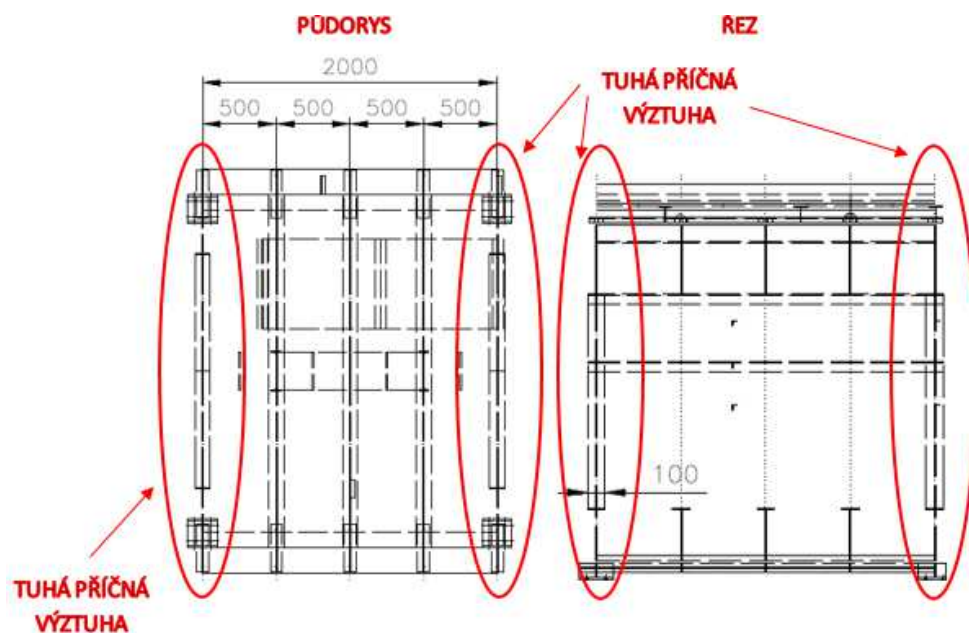
$$= 1,001 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Posouzení kritéria zabránění vybočení výztuhy zkroucením:

$$\frac{I_T}{I_p} = \frac{1,001 \cdot 10^{-7}}{3,251 \cdot 10^{-6}} = 0,031 \geq 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{355}{210 \cdot 10^3} = 8,96 \cdot 10^{-3}$$

Přibližné posouzení je splněno, předpokládá se dostatečná tuhost výztuhy proti vybočení zkroucením.

Přesto, že výztuhy dolní a horní pásnice vychází dle posudku dostatečně tuhé a lze je považovat za tuhé podpory boulicím panelům, je horní pásnice posouzena v následujících posudcích komorového průřezu s konzervativním předpokladem tuhé výztuhy pouze ve vzdálenosti $a=2$ m. V případě, že by nevyhověly posudky únosnosti, je možné do výpočtu boulení panelu průřezu zahrnout výztuhy v místě horní tlačené pásnice po vzdálenostech $a=0,5$ m.

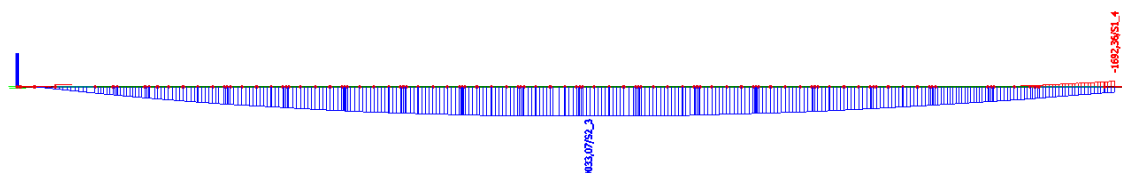


Obr. 156: Umístění příčných výztuh v průřezu

7.3.3 Posouzení prosté ohybové únosnosti (ohyb kolem osy y)

Maximální vnitřní síly S2_3:

$$M_{y,Edmax} = 9,033 \text{ MNm} \quad \dots \text{ uprostřed pole}$$



Obr. 157: Ohybový moment M_y

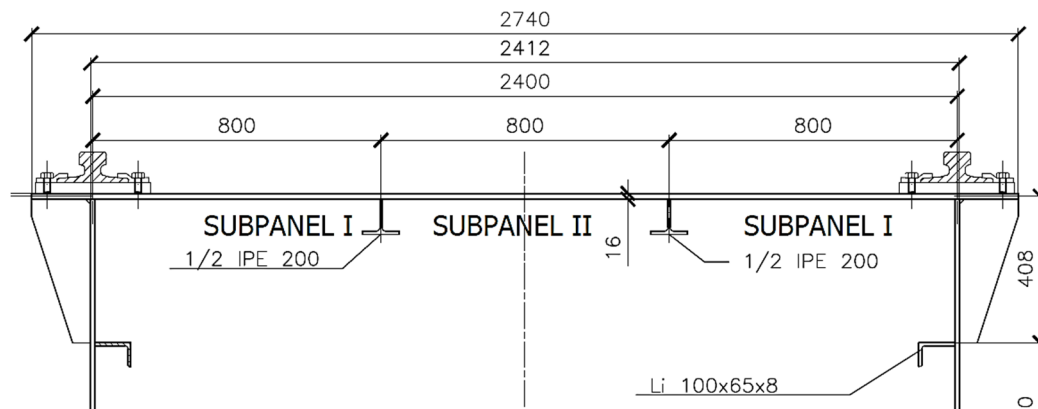
Z průběhu ohybového momentu M_y je patrné že ve střední části nosníku je tlačená horní pásnice průřezu, naopak v místě přírubového spoje jsou tlačena dolní vlákna průřezu. Z tohoto průběhu je jasné, které části průřezu budou náchylné k vzniku lokálního vyboulení.

A) Vyztužená pásnice s podélnými výztuhami

U stěn vyztužených podélnými výztuhami je zapotřebí stanovit účinné plochy lokálního boulení části průřezu mezi výztuhami tzv. subpanelů a účinnou

plochu celkového boulení pro vyztužený panel. Vzdálenost hlavních příčných výztuh v místě maximálního ohybového momentu $a = 2 \text{ m}$.

Výpočet účinné plochy subpanelů



Obr. 158: Tlačená část průřezu – horní pásnice

Pro krajní vnější tlačenou pásnici s délkou 170 mm lze konzervativně předpokládat součinitel lokálního boulení roven 1,00.

Zatřídění podélných výztuh

Stojina průřezu ½ IPE200

$$\frac{c}{t} = \frac{104}{5,6} = 18,57 \leq 33\varepsilon = 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$

Třída průřezu 1

Pásnice ½ IPE200

$$\frac{c}{t} = \frac{50}{8,0} = 6,25 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Třída průřezu 1

Výztuhy jsou třídy průřezu 1 a nemusí se jejich plocha redukovat s ohledem na lokální možnost boulení.

Subpanel I (část horní pásnice na okraji)

$$b_1 = 800 \text{ mm}$$

$$A_1 = 800 \cdot 16 = 12800 \text{ mm}^2$$

Součinitel kritického napětí se stanoví dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5, lze předpokládat, že celá horní pásnice je rovnoměrně tlačená, poměr napětí je tedy roven 1.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,00$$

$$\overline{\lambda_{p1}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{800}{16}}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 1,082$$

$$\overline{\lambda_{p1}} = 1,082 \geq 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda_{p2}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p2}}^2} = \frac{1,082 - 0,055(3+1)}{1,082^2} = 0,736 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{1,eff} = b_1 \cdot \rho_1 = 800 \cdot 0,736 = 588,8 \text{ mm}$$

$$A_1 = A_1 \cdot \rho_1 = 12800 \cdot 0,736 = 9420,8 \text{ mm}^2$$

$$b_{1,edge,eff} = b_{1,edge} \cdot \rho_1 = 400 \cdot 0,736 = 294,40 \text{ mm}$$

Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 588,8 = 294,40 \text{ mm}$$

Subpanel II (část horní pásnice mezi výztuhami)

$$b_2 = 800 \text{ mm}$$

$$A_2 = 800 \cdot 16 = 12800 \text{ mm}^2$$

$$\overline{\lambda_{p2}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{800/16}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 1,082$$

$$\overline{\lambda_{p2}} = 1,082 \geq 0,673$$

$$\rho_2 = \frac{\overline{\lambda_{p2}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p2}}^2} = \frac{1,082 - 0,055(3+1)}{1,082^2} = 0,736 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

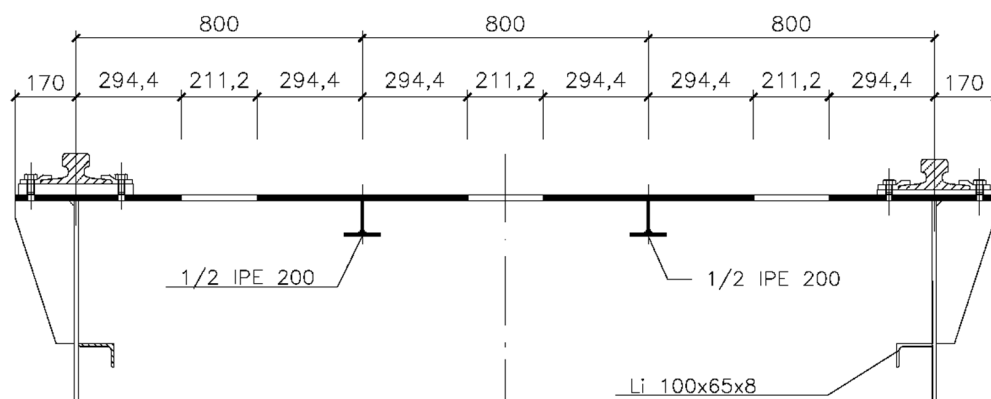
$$b_{2,eff} = b_2 \cdot \rho_2 = 800 \cdot 0,736 = 588,8 \text{ mm}$$

$$A_2 = A_2 \cdot \rho_1 = 12800 \cdot 0,736 = 9420,8 \text{ mm}^2$$

Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 588,8 = 294,40 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 588,8 = 294,40 \text{ mm}$$



Obr. 159: Efektivní účinný průřez horní pásnice s vlivem lokálního boulení

Účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů (s výjimkou účinné části, která je podepřena krajní sousední stěnou se šířkou $b_{1,edge,eff}$) s vlivem lokálního boulení:

$$A_{c,eff,loc} = 2,1735 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

V následujícím výpočtu je nutné stanovit kritické napětí pro celkové boulení vyztuženého panelu.

Průřezová plocha s plnou efektivní plochou:

$$A_{sl} = 2,849 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti s plnou efektivní plochou:

$$I_{sl,y} = 2,194 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Poloměr setrvačnosti kolem hlavní osy y:

$$i_{sl,y} = \sqrt{\frac{I_{sl,y}}{A_{sl}}} = \sqrt{\frac{2,194 \cdot 10^{-5}}{2,849 \cdot 10^{-2}}} = 0,0278 \text{ m}$$

Kritické prutové napětí pro vyztuženou stěnu:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 2,194 \cdot 10^{-5}}{2,849 \cdot 10^{-2} \cdot 2^2} = 399,028 \text{ MPa}$$

Kritické stěnové napětí pro vyztuženou stěnu:

Norma ČSN EN 1993-1-5 v příloze A stanovuje postup pro určení pružného kritického napětí ortotropní stěny. Za ortotropní stěnu lze pokládat stěnu vyztuženou minimálně třemi podélnými výztuhami. Tento postup pro následující

nosník nelze použít, jelikož je vyztužen pouze výztuhami dvěma. V pokračování přílohy A2 se nachází obecný postup stanovení kritického napětí dle [8]. Pro tento nosník je vhodné a pro lepší pochopení problematiky optimálněji použít metodu založenou na teorii průhybu fiktivního nosníku na elastickém podloží (pružná stěna) tzv. **Engesserovo řešení** (použitelné řešení pouze pro stěnu vyztuženou jednou nebo dvěma výztuhami).

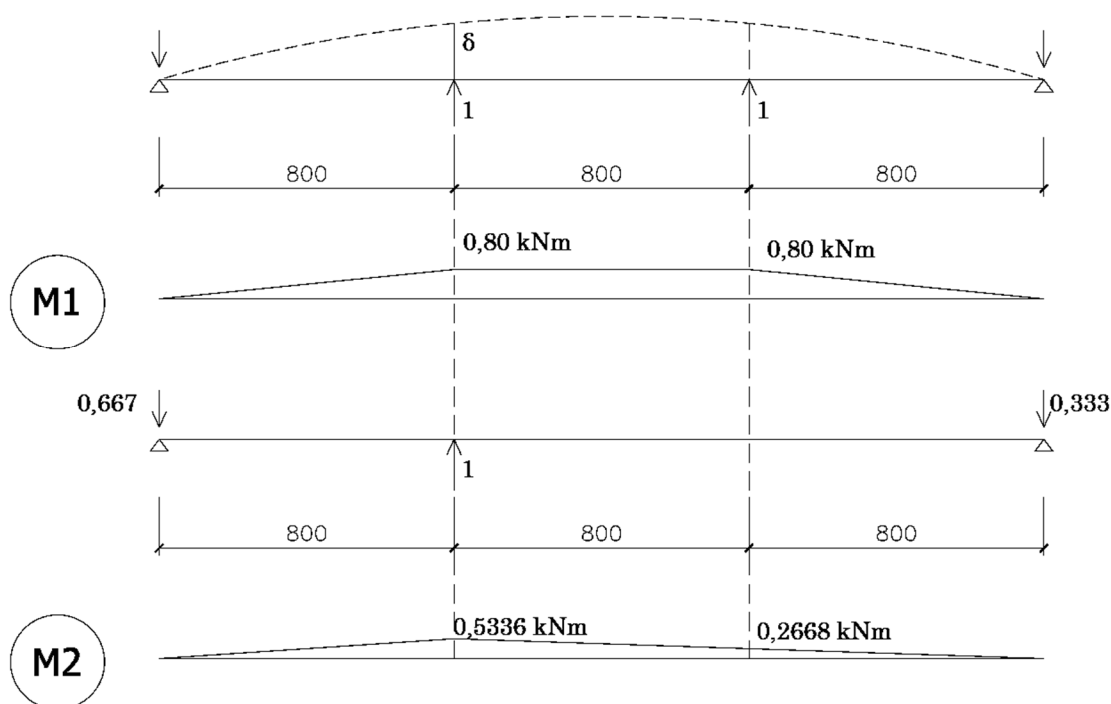
Je nutné určit součinitel tuhosti k tzv. pérovou konstantu z průhybu pruhu stěny šířky 1 m a zatížené jednotkovou silou v místě výztuh vztaženou na 1 metr šířky stěny. Z toho vyplývá, že pro malou hodnotu pérové tuhosti vybočí výztuha ve směru jedné sinusové polovlně podél vzdálenosti vymezující příčné výztuhy, naopak pro velké hodnoty vybočí ve více vlnách.

Stanovení pérové tuhosti

Předpokladem je, že obě výztuhy vybočí současně a tuhost se koncentruje do polohy těžiště jednotlivých výztuh.

Ohybová tuhost 1 m širokého pásu stěny:

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{210 \cdot 10^3 \cdot 0,016^3}{12(1 - 0,3^2)} = 0,0788 \text{ MNm}$$



Obr. 160: Průběh momentů pro zjištění pérové konstanty

$$\bar{\delta} = \frac{1}{3} \cdot 0,8^2 \cdot 0,5336 + \frac{1}{3} \cdot 0,8^2 \cdot 0,2668 + \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot (0,2668 + 0,5336) \cdot 0,8 = 0,4269$$

$$\delta = \frac{\bar{\delta}}{D} = \frac{0,4269}{0,0788} = 5,418 \text{ m}^2/\text{MN}$$

Pérová tuhost:

$$k = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{5,418} = 0,184 \text{ MN}/\text{m}^2$$

Plocha jedné výztuhy:

$$A_{sl,i} = \frac{A_{sl}}{2} = \frac{2,849 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,0143 \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti s plnou efektivní plochou:

$$I_{sl,y,i} = \frac{I_{sl}}{2} = \frac{2,194 \cdot 10^{-5}}{2} = 1,097 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy v libovolném počtu sinusových polovin se stanoví dle vztahu

$$N_{cr1} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) \quad (4)$$

kde m je počet polovin, a vzdálenost hlavních příčných výztuh a $I_{sl,i}$ moment setrvačnosti jedné výztuhy.

$$EI_{sl,i} = 210 \cdot 10^3 \cdot 1,097 \cdot 10^{-5} = 2,304 \text{ MNm}^2$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy v jedné sinusové polovině:

$$N_{cr1} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 2,304}{2^2} \left(1^2 + \frac{0,184 \cdot 2^2}{1^2 \pi^4 \cdot 2,304} \right) = 5,70 \text{ MN}$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy ve dvou sinusových polovinách:

$$N_{cr2} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 2,304}{2^2} \left(2^2 + \frac{0,184 \cdot 2^2}{2^2 \pi^4 \cdot 2,304} \right) = 22,74 \text{ MN}$$

Kritické stěnové napětí při vybočení v jedné polovině:

$$\sigma_{cr,p} = \frac{N_{cr1}}{A_{sl,i}} = \frac{5,70}{0,0143} = 398,60 \text{ MPa}$$

Pro srovnání je zde uveden výpočet kritického pružného napětí dle přílohy A2 normy ČSN EN 1993-1-5. Pomocí tohoto výpočtu lze stanovit hodnotu kritického napětí stěny, výsledek je ale přibližný dle doporučení [3], proto je lepší pro podobné celoplošně tlačené pásnice použít postup uvedený výše.

Horní výztuha

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1 = \frac{3 - 1}{5 - 1} \cdot 800 = 400 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2 = \frac{2}{5 - 1} \cdot 800 = 400 \text{ mm}$$

Spodní výztuha

$$b_{2,inf} = \frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_1 = \frac{3 - 1}{5 - 1} \cdot 800 = 400 \text{ mm}$$

$$b_{3,inf} = 400 \text{ mm}$$

Průřezové charakteristiky jednotlivých výztuh včetně přilehlých částí pásnice

Průřezové charakteristiky výztuh včetně spolupůsobících částí stěny průřezu jsou odečteny ze software Scia Engineer.

Výztuha

Průřezová plocha výztuhy I, II:

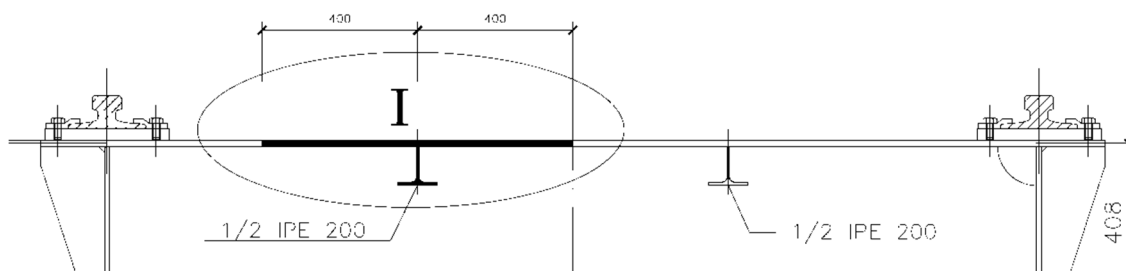
$$A_{sl} = 1,4247 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od z od střednice pásnice:

$$x_{sl} = 9 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy y:

$$I_{sl} = 1,097 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$



Obr. 161: Účinný průřez výztuhy

Průřezové charakteristiky sloučené výztuhy

Průřezová plocha sloučené výztuhy:

$$A_{sl,lumped} = A_{sl,I} + A_{sl,II} = 1,4247 \cdot 10^{-2} + 1,4247 \cdot 10^{-2} = 0,0285 \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti sloučené výztuhy kolem osy z:

$$I_{sl,lumped} = I_{sl,II} + I_{sl,I} = 1,097 \cdot 10^{-5} + 1,097 \cdot 10^{-5} = 2,194 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Napětí v horní pásnici:

$$\sigma_{top} = \sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{W_{y,top}} = \frac{9033 \cdot 10^3}{0,1074} \cdot 10^{-6} = 84,11 \text{ MPa}$$

Síla ve výztuze:

$$F_{sl,I} = F_{sl,II} = A_{sl,I} \cdot \sigma_{sl1} = 1,4247 \cdot 10^{-2} \cdot (-84,11) \cdot 10^6 = -1198,32 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Umístění výslednice sil jednotlivých výztuh (z momentové podmínky k střednici stěny):

$$h_{f,lumped} \cdot (F_{sl,I} + F_{sl,II}) = F_{sl,I} \cdot h_{f1} + F_{sl,II} \cdot h_{f2}$$

$$h_{f,lumped} = \frac{F_{sl,II}}{F_{sl,I} + F_{sl,II}} (h_{f2} - h_{f1}) + h_{f1} = \frac{1198,32}{1198,32 + 1198,32} (1,6 - 0,8) + 0,8$$

$$= 1,2 \text{ m}$$

Výpočet potvrdil předpoklad, že se poloha výslednice nachází mezi výztuhami (ve středu) horní pásnice.

Kritické pružné napětí stěny

Kritické pružné napětí stěny se stanoví jako nejnižší vypočítaná hodnota z případů – vybočení horní výztuhy, vybočení spodní výztuhy a vybočení sloučené výztuhy.

Vybočení první a druhé výztuhy

$$b_{I1}^* = 0,800 \text{ m}$$

$$b_{I2}^* = 0,800 \text{ m}$$

$$B_I^* = b_{I2}^* + b_{I1}^* = 0,800 + 0,800 = 1,600 \text{ m}$$

$$a_{c,I} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}{t_f^3 B_I^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{1,097 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8^2 \cdot 0,8^2}{0,016^3 \cdot 1,60}} = 3,94 \text{ m} \geq a = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_f^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 1,097 \cdot 10^{-5}}{1,425 \cdot 10^{-2} \cdot 2^2} \\ &\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,016^3 \cdot 1,6 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 1,425 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8^2 \cdot 0,8^2} = 425,14 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Vybočení sloučené výztuhy

$$b_{lumped1}^* = 1,200 \text{ m}$$

$$b_{lumped2}^* = 1,200 \text{ m}$$

$$B_{lumped}^* = b_{lumped1}^* + b_{lumped2}^* = h_w = 1,200 + 1,200 = 2,400 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} a_{c,lumped} &= 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} b_{II1}^{*2} b_{II2}^{*2}}{t_w^3 B_{II}^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{2,194 \cdot 10^{-5} \cdot 1,2^2 \cdot 1,2^2}{0,016^3 \cdot 2,400}} = 6,35 \text{ m} > a \\ &= 2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,lumped} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 2,194 \cdot 10^{-5}}{0,0285 \cdot 2^2} + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,016^3 \cdot 2,40 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 0,0285 \cdot 1,2^2 \cdot 1,2^2} \\ &= 402,77 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_{cr,p} = \min\{\sigma_{cr,plumped}, \sigma_{cr,pI}, \sigma_{cr,pII}\} = \min\{425,14; 402,77\} \cdot 10^6 \\ = 425,14 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Vzdálenosti b_1 a b_2 jsou vzdálenosti měřené od svislých okrajů stěny a výztuhy a v celkovém součtu se musejí rovnat celkové šířce b .

Stanovení jednotlivých štíhlostí pro prutové a stěnové chování panelu

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_{sl}} = \frac{2,1735 \cdot 10^{-2}}{2,849 \cdot 10^{-2}} = 0,763$$

Poměrná stěnová štíhlost ekvivalentní stěny:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,763 \cdot 355}{398,60}} = 0,824 \geq 0,673$$

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,824 - 0,055(3 + 1)}{0,824^2} = 0,890$$

Poměrná prutová štíhlost

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,763 \cdot 355}{399,028}} = 0,824 \geq 0,673$$

$$\rho_c = \frac{\bar{\lambda}_c - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_c^2} = \frac{0,824 - 0,055(3 + 1)}{0,824^2} = 0,890$$

Vzdálenost těžiště vyztuženého pásu (plné výztuhy):

$$e = 9 \text{ mm}$$

Hodnoty jsou odečteny ze software Scia Engineer a jsou vztaženy ke střednici horního pásu.

Vzdálenost těžiště plné výztuhy:

$$e = 83 \text{ mm}$$

Vzdálenost těžiště efektivního vyztuženého pásu:

$$e = 11 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi těžištěm výztuhy a těžištěm vyztuženého pásu:

$$e = 83 - \min e = 83 - 9 = 74 \text{ mm}$$

Poloměr setrvačnosti vyztuženého pásu kolem hlavní osy y:

$$i_{sl,y} = 0,0278 \text{ m}$$

Jedná se o otevřené výztuhy, součinitel imperfekce je pro křivku c $\alpha = 0,49$

Zvýšení součinitele imperfekce (pro vyztužené stěny) na základě normy ČSN EN 1993-1-5:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{27,8/74} = 0,730$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,5 [1 + 0,73(0,89 - 0,2) + 0,89^2] = 1,148$$

Součinitel vzpěrnosti prutu:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{1,148 + \sqrt{1,148^2 - 0,890^2}} = 0,534$$

Interakce mezi stěnovým a prutovým chováním:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} = \frac{398,60}{399,028} - 1 = 0$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c = 0,534$$

Snížení efektivní plochy s ohledem na smykové ochabnutí:

$$L_e = 2 \cdot L = 2 \cdot 37,59 = 75,18 \text{ m}$$

$$\frac{L_e}{50} = \frac{75,18}{50} = 1,504 \text{ m}$$

$$b_0 = \frac{2,4}{2} = 1,20 \text{ m} \leq 1,504 \text{ m}$$

Nemusí se redukovat účinná plocha vlivem smykového ochabnutí v pásnicích pro mezní stav únosnosti.

Efektivní plocha tlačené horní pásnice

Snížení plochy součinitelem boulení je uvažováno jako jednotná redukce. Dle ustanovení v [10] lze tuto redukci brát jako rovnoměrnou pro celý průřez. Pro výpočet efektivních průřezových charakteristik průřezu se do výpočtu zavede redukovaná tloušťka vyztuženého panelu pomocí tohoto součinitele.

Střední část:

$$A_{eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} = 0,534 \cdot 2,1735 \cdot 10^{-2} = 0,0116 \text{ m}^2$$

Okrajové části:

$$A_{eff} = 2 \cdot t_f \cdot (b_{3,edge,eff} + b_{1,out}) = 2 \cdot 0,016 \cdot (0,2944 + 0,170) = 0,0149 \text{ m}^2$$

Redukovaná tloušťka pásnice:

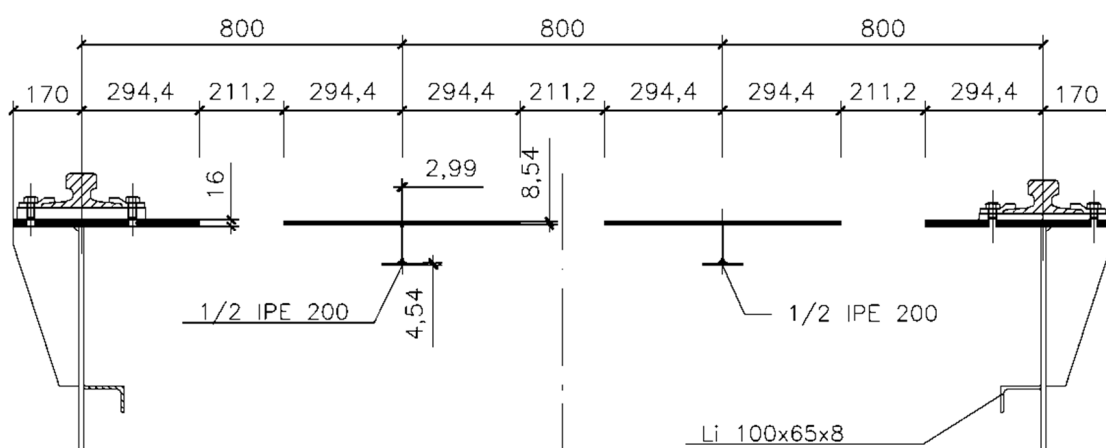
$$t_{f,red} = t_f \cdot \rho_c = 16 \cdot 0,534 = 8,544 \text{ mm}$$

Redukovaná tloušťka stojiny výztuhy:

$$t_{w,sl,red} = t_{w,sl} \cdot \rho_c = 5,6 \cdot 0,534 = 2,99 \text{ mm}$$

Redukovaná tloušťka pásnice výztuhy:

$$t_{f,sl,red} = t_{f,sl} \cdot \rho_c = 8,5 \cdot 0,534 = 4,539 \text{ mm}$$



Obr. 162: Redukovaný účinný průřez tlačené pásnice

B) Vyztužená stěna průřezu s podélnými výztuhami

Stěna je navržena tloušťky 12 mm a je vyztužena dvěma podélnými výztuhami profilu Li 100x65x8 mm, které se nacházejí v tlačené oblasti

Zatřídění podélných výztuh

$$\frac{c}{t} = \frac{100}{8} = 12,50 \leq 33\varepsilon = 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 26,85$$
$$\frac{c}{t} = \frac{65}{8,0} = 8,125 \leq 9\varepsilon = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 7,32$$

Zatřídění stěny průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{1992}{12} = 166 \geq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Figure 1: Schematic diagram of the test specimen. The diagram shows a vertical cross-section of a specimen divided into three subpanels. Subpanel I (top) has a height of 412 mm and contains a top flange and a vertical web. Subpanel II (middle) has a height of 400 mm and contains two horizontal stiffeners labeled 'Li 100x65x8'. Subpanel III (bottom) has a height of 1180 mm and contains a vertical web. The total height is 1692 mm. A horizontal dimension of 12 mm is shown for the web thickness. A stress distribution diagram on the right shows a linear variation from compression (σ_1) at the top to tension (σ_2) at the bottom, with a neutral axis at the interface between Subpanel II and Subpanel III. The maximum compression stress is 934.55 and the maximum tension stress is 1057.45.

338

Subpanel I (část horní stěny)

$$b_1 = 412 - 8 - 4 = 400 \text{ mm}$$

$$A_1 = 400 \cdot 12 = 4800 \text{ mm}^2$$

Součinitel kritického napětí se stanoví pro vnitřní tlačnou část stěny průřezu dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5.

$$\psi = \frac{\sigma_{sl,1}}{\sigma_1} = \frac{934,55 - 412}{934,55} = 0,559$$

$$k_\sigma = \frac{8,2}{1,05 + \psi} = \frac{8,2}{1,05 + 0,559} = 5,096$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{400/12}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{5,096}} = 0,639$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 0,639 \leq 0,673$$

$$\rho_1 = 1,00$$

$$b_{1,eff} = b_1 \cdot \rho_1 = 400 \cdot 1,00 = 400 \text{ mm}$$

$$A_1 = A_1 \cdot \rho_1 = 4800 \cdot 1,00 = 4800 \text{ mm}^2$$

Subpanel II (vnitřní část stěny)

$$b_2 = 400 - 8 = 392 \text{ mm}$$

$$A_2 = 392 \cdot 12 = 4704 \text{ mm}^2$$

$$\psi = \frac{\sigma_{sl,2}}{\sigma_1} = \frac{934,55 - 812}{934,55} = 0,131$$

$$k_\sigma = \frac{8,2}{1,05 + \psi} = \frac{8,2}{1,05 + 0,131} = 6,943$$

$$\overline{\lambda}_{p2} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{392/12}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{6,943}} = 0,537$$

$$\overline{\lambda}_{p2} = 0,537 \leq 0,673$$

$$\rho_2 = 1,00$$

$$b_{2,eff} = b_2 \cdot \rho_2 = 392 \cdot 1,00 = 392 \text{ mm}$$

$$A_2 = A_2 \cdot \rho_2 = 4704 \cdot 1,00 = 4704 \text{ mm}^2$$

Subpanel III (spodní část stěny v tlačené oblasti)

$$b_{3c} = 934,55 - 412 - 400 - 4 = 118,55 \text{ mm}$$

$$b_3 = 1057,45 - 8 + 118,55 = 1168 \text{ mm}$$

$$A_3 = 1168 \cdot 12 = 14016 \text{ mm}^2$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_{sl,2}} = \frac{934,55 - 1992}{934,55 - 812} = -8,629$$

$$k_\sigma = 5,98(1 - \psi)^2 = 5,98(1 - (-8,629))^2 = 554,45$$

$$\overline{\lambda}_{p3} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{118,55/12}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{554,45}} = 0,018$$

$$\overline{\lambda}_{p3} = 0,018 \leq 0,673$$

$$\rho_3 = 1,00$$

$$b_{3,eff} = b_3 \cdot \rho_3 = 118,55 \cdot 1,00 = 118,55 \text{ mm}$$

Na subpanelech stěny nedochází k lokálnímu boulení, není potřeba redukovat plochu stěny. Musí se ale vyšetřit možnost boulení celé výztuhy nebo celkového vyztuženého panelu. Pro stanovení kritického pružného napětí stěny lze předpokládat nejprve vybočení jedné výztuhy, přičemž druhá výztuha tvoří tuhou podporu stěně a vybočení obou výztuh zároveň se nahradí výztuhou sloučenou, která musí mít plochu a moment setrvačnosti dán součtem hodnot obou výztuh. Je potřeba stanovit skutečný průběh napětí, jelikož umístění sloučené výztuhy se nachází v místě výslednice sil jednotlivých výztuh.

$$\sigma_{top} = \sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{W_{y,top}} = \frac{9033 \cdot 10^3}{0,1074} \cdot 10^{-6} = 84,11 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{bottom} = \sigma_2 = \frac{M_{Ed}}{W_{y,bottom}} = \frac{9033 \cdot 10^3}{0,0951} = 94,98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sl,1} = \frac{\sigma_1}{0,943} \cdot (0,943 - 0,412 - 0,008) = \frac{84,11}{0,943} \cdot (0,943 - 0,412 - 0,008) \\ = 46,64 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sl,2} = \frac{\sigma_1}{0,943} \cdot (0,943 - 0,412 - 0,400 - 0,008) \\ = \frac{84,11}{0,943} \cdot (0,943 - 0,412 - 0,400 - 0,008) = 10,97 \text{ MPa}$$

Spolupůsobící šířka stěny s výztuhou je stanovena dle tabulky A.1 dle [8] pro plnou plochu jelikož není potřeba redukovat plochu s ohledem na lokální boulení stěny.

Horní výztuha

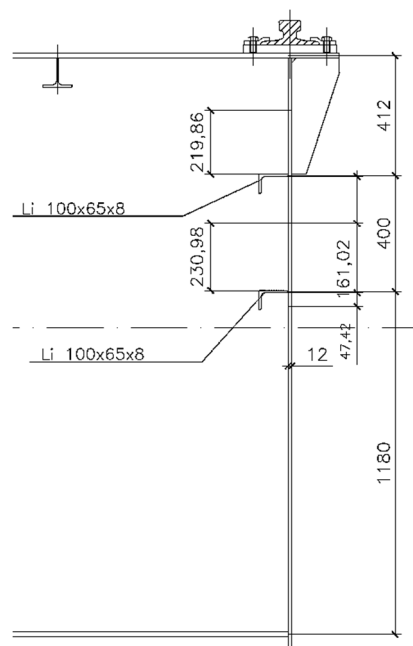
$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1 = \frac{3 - 0,559}{5 - 0,559} \cdot 400 = 219,86 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2 = \frac{2}{5 - 0,131} \cdot 392 = 161,02 \text{ mm}$$

Spodní výztuha

$$b_{2,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1 = \frac{3 - 0,131}{5 - 0,131} \cdot 392 = 230,98 \text{ mm}$$

$$b_{3,sup} = 0,4 \cdot b_{3,c} = 0,4 \cdot 118,55 = 47,42 \text{ mm}$$



Obr. 164: Určení spolupůsobících částí stěny s výztuhou

Průřezové charakteristiky jednotlivých výztuh včetně přilehlých částí stěny

Průřezové charakteristiky výztuh včetně spolupůsobících částí stěny průřezu jsou odečteny ze software Scia Engineer.

Horní výztuha

Průřezová plocha výztuhy I:

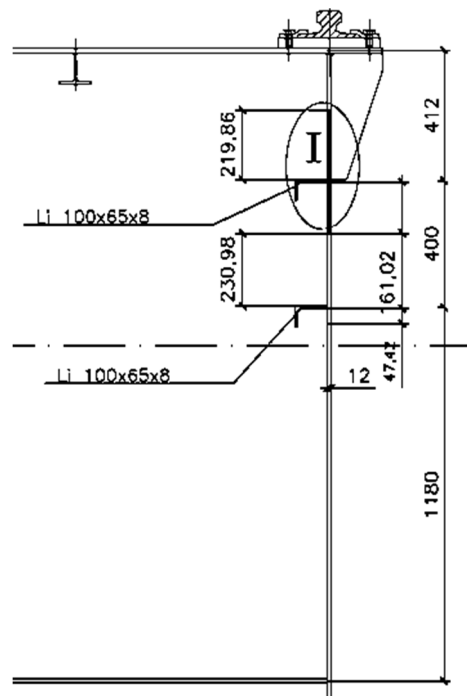
$$A_{sl,I} = 5,947 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od y od vnější hrany stěny:

$$x_{sl,I} = 22 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,I} = 6,508 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



Obr. 165: Účinný průřez horní výztuhy

Spodní výztuha

Průřezová plocha výztuhy II:

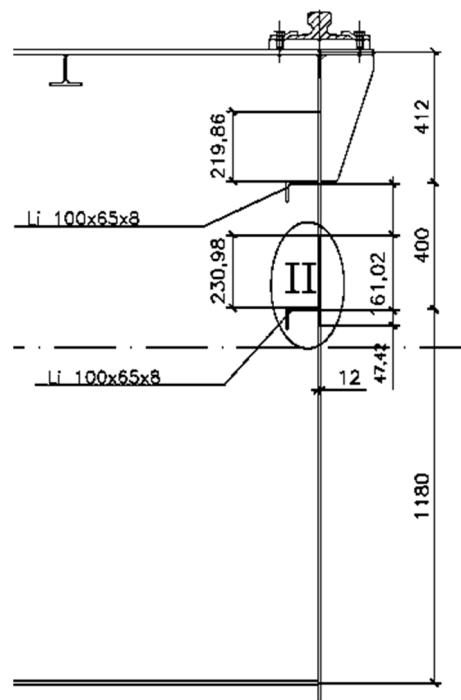
$$A_{sl,II} = 4,717 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od y od vnější hrany stěny:

$$x_{sl,II} = 26 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy II kolem osy z:

$$I_{sl,II} = 4,429 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



Obr. 166: Účinný průřez spodní výztuhy

Průřezové charakteristiky sloučené výztuhy

Průřezová plocha sloučené výztuhy:

$$A_{sl,lumped} = A_{sl,I} + A_{sl,II} = 4,717 \cdot 10^{-3} + 5,947 \cdot 10^{-3} = 10,664 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti sloučené výztuhy kolem osy z:

$$I_{sl,lumped} = I_{sl,II} + I_{sl,I} = 6,508 \cdot 10^{-6} + 4,429 \cdot 10^{-6} = 10,937 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Síla v první výztuze:

$$F_{sl,I} = A_{sl,I} \cdot \sigma_{sl1} = 5,947 \cdot (-46,64) \cdot 10^3 = -277,37 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{sl,II} = A_{sl,II} \cdot \sigma_{sl2} = 4,717 \cdot (-10,97) \cdot 10^3 = -51,75 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Umístění výslednice sil jednotlivých výztuh (z momentové podmínky k střednici horní pásnice):

$$h_{w,lumped} \cdot (F_{sl,I} + F_{sl,II}) = F_{sl,I} \cdot h_{w1} + F_{sl,II} \cdot h_{w2}$$

$$\begin{aligned} h_{w,lumped} &= \frac{F_{sl,II}}{F_{sl,I} + F_{sl,II}} (h_{w2} - h_{w1}) + h_{w1} \\ &= \frac{51,75}{51,75 + 277,37} (0,812 - 0,412) + 0,412 = 0,475 \text{ m} \end{aligned}$$

Kritické pružné napětí stěny

Kritické pružné napětí stěny se stanoví jako nejnižší vypočítaná hodnota z případů – vybočení horní výztuhy, vybočení spodní výztuhy a vybočení sloučené výztuhy.

Vybočení horní výztuhy

$$b_{I1}^* = 0,412 \text{ m}$$

$$b_{I2}^* = 0,400 \text{ m}$$

$$B_I^* = b_{I2}^* + b_{I1}^* = 0,412 + 0,400 = 0,812 \text{ m}$$

$$a_{c,I} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}{t_w^3 B_I^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{6,508 \cdot 10^{-6} \cdot 0,412^2 \cdot 0,4^2}{0,012^3 \cdot 0,812}} = 2,56 \text{ m} \geq a = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\
&= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 6,508 \cdot 10^{-6}}{5,947 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} \\
&\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 0,812 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 4,717 \cdot 10^{-3} \cdot 0,412^2 \cdot 0,4^2} = 823,26 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \\
\sigma_{cr,p,I} &= \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{0,935}{0,935 - 0,412} \cdot 823,26 \cdot 10^6 = 1471,79 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2
\end{aligned}$$

Vybočení spodní výztuhy

$$b_{II1}^* = 0,400 \text{ m}$$

$$b_{II2}^* = 1,057 \text{ m}$$

$$B_{II}^* = b_{II2}^* + b_{II1}^* = 0,400 + 1,057 = 1,457 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
a_{c,II} &= 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} b_{II1}^{*2} b_{II2}^{*2}}{t_w^3 B_{II}^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{4,429 \cdot 10^{-6} \cdot 0,400^2 \cdot 1,057^2}{0,012^3 \cdot 1,457}} = 3,24 \text{ m} > a \\
&= 2 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\
&= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 4,429 \cdot 10^{-6}}{4,717 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} \\
&\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 1,457 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 4,717 \cdot 10^{-3} \cdot 1,057^2 \cdot 0,4^2} = 556,33 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \\
\sigma_{cr,p,I} &= \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{0,935}{0,935 - 0,812} \cdot 556,33 \cdot 10^6 = 4229,01 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2
\end{aligned}$$

Vybočení sloučené výztuhy

$$b_{lumped1}^* = 0,475 \text{ m}$$

$$b_{lumped2}^* = 1,517 \text{ m}$$

$$B_{lumped}^* = b_{lumped1}^* + b_{lumped2}^* = h_w = 0,475 + 1,517 = 1,992 \text{ m}$$

$$a_{c,lumped} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} b_{II1}^{*2} b_{II2}^{*2}}{t_w^3 B_{II}}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{10,937 \cdot 10^{-6} \cdot 0,475^2 \cdot 0,517^2}{0,012^3 \cdot 1,992}} = 2,86 \text{ m}$$

$$> a = 2 \text{ m}$$

$$\sigma_{cr,sl,lumped} = \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}$$

$$= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 10,937 \cdot 10^{-6}}{10,664 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2}$$

$$+ \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 1,992 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 10,664 \cdot 10^{-3} \cdot 1,517^2 \cdot 0,475^2}$$

$$= 545,95 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p,lumped} = \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{0,935}{0,935 - 0,475} \cdot 545,95 \cdot 10^6 = 1109,70 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p} = \min\{\sigma_{cr,p,lumped}, \sigma_{cr,pI}, \sigma_{cr,pII}\} = \min\{1109,70; 4229,01; 1471,79\} \cdot 10^6$$

$$= 1109,70 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

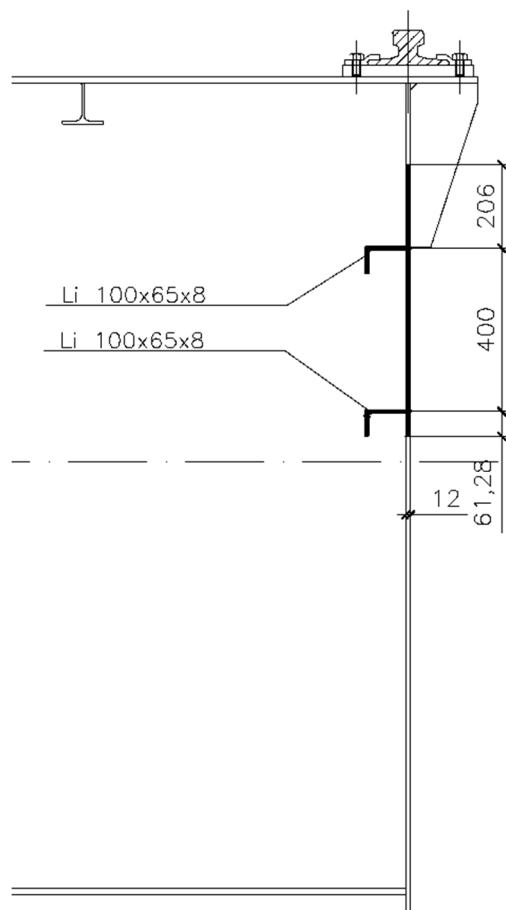
Stěnové chování

Jelikož se lokální boulení v tlačené oblasti stěny průřezu neprojeví a nedochází k boulení subpanelů je efektivní účinná průřezová plocha rovna plné ploše stěny v tlačené oblasti zpevněné deskou mimo subpanely podporovány sousední deskou.

Šířka spolupůsobící desky:

$$b_{1,edge} = \frac{b_1}{2} = \frac{412}{2} = 206 \text{ mm}$$

$$b_{3,edge} = \frac{b_1}{2} = \frac{122,55}{2} = 61,28 \text{ mm}$$



Obr. 167: Účinná průřezová plocha stěny v tlačené oblasti

Průřezové charakteristiky (odečteny ze software Scia Engineer)

Účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů (s výjimkou účinné části, která je podepřená krajní sousední pásnicí a vedle tažené části stěny se šířkou $b_{1,edge}$ a $b_{3,edge}$):

$$A_{c,eff,loc} = 1,056 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

V následujícím výpočtu je nutné stanovit kritické napětí pro celkové boulení vyztuženého panelu.

Průřezová plocha s plnou efektivní plochou:

$$A_{sl} = A_{c,eff,loc} = 1,056 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Stanovení jednotlivých štíhlostí pro stěnové chování panelu:

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_{sl}} = \frac{1,056 \cdot 10^{-2}}{1,056 \cdot 10^{-2}} = 1,00$$

Poměrná stěnová štíhlost ekvivalentní stěny:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{1,00 \cdot 355}{1109,70}} = 0,566 \leq 0,673$$

$$\rho_p = 1,00$$

Prutové chování

Stanoví se pro výztuhu horní, jelikož je více tlačení než výztuha v nižší pozici tlačené oblasti. Průřezové charakteristiky výztuhy již byly stanoveny v případě výpočtu kritického pružného napětí stěny.

Průřezová plocha výztuhy I:

$$A_{sl,I} = 5,947 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od y od vnější hrany stěny:

$$x_{sl,I} = 22 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,I} = 6,508 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Pružné kritické prutové napětí pro výztuhu:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 6,508 \cdot 10^{-6}}{5,947 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} = 567,03 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Pružné kritické prutové napětí

$$\sigma_{cr,c} = \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl} = \frac{0,935}{0,935 - 0,412} \cdot 567,03 \cdot 10^6 = 1013,72 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Poměrná prutová štíhlost

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{1,00 \cdot 355}{1013,72}} = 0,592 \leq 0,673$$

$$\rho_c = 1,00$$

Poloměr setrvačnosti kolem hlavní osy z:

$$i_{sl,z} = \sqrt{\frac{I_{sl,z}}{A_{sl}}} = \sqrt{\frac{6,508 \cdot 10^{-6}}{5,947 \cdot 10^{-3}}} = 0,033 \text{ m}$$

Vzdálenost těžiště od střednice stěny:

$$e_2 = 16 \text{ mm}$$

Vzdálenost těžiště samotné výztuhy od střednice stěny:

$$e_1 = 73,26 \text{ mm}$$

$$e = \max\{e_1; e_2\} = \max\{16; 73,26\} = 73,26 \text{ mm}$$

Stěna průřezu je dostatečně tuhá a dle výpočtu lze předpokládat, že nebude docházet k vybočení celého panelu, výztuhy a ani k lokálnímu boulení.

Zvýšení součinitele imperfekce (pro vyztužené stěny) na základě normy ČSN EN 1993-1-5:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{33/73,26} = 0,690$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,5 [1 + 0,69(0,592 - 0,2) + 0,592^2] = 0,810$$

Součinitel vzpěrnosti prutu:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,910 + \sqrt{0,910^2 - 0,592^2}} = 0,625$$

Interakce mezi stěnovým a prutovým chováním:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} = \frac{1109,70}{1013,72} - 1 = 0,095$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,625) \cdot 0,095 \cdot (2 - 0,095) + 0,625 = 0,693$$

Efektivní plocha tlačené části stěny průřezu

Snížení plochy součinitelem boulení je uvažováno jako jednotná redukce. Dle ustanovení v [8] lze tuto redukci brát jako rovnoměrnou pro celý průřez vyztužené

stěny. Pro výpočet efektivních průřezových charakteristik průřezu se do výpočtu zavede redukovaná tloušťka vyztuženého panelu pomocí tohoto součinitele.

Střední část:

$$A_{eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} = 0,693 \cdot 1,056 \cdot 10^{-2} = 0,07318 \text{ m}^2$$

Okrajové části:

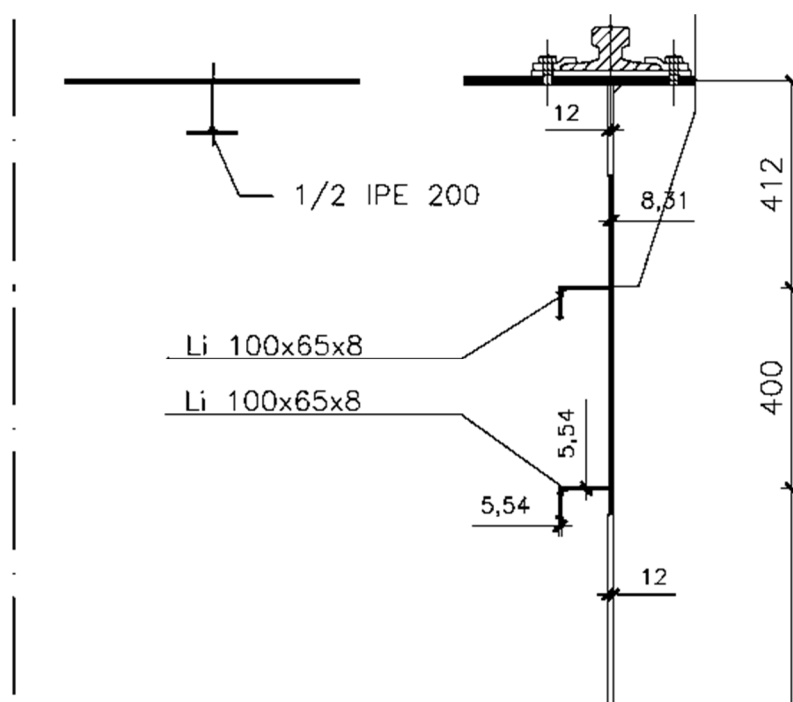
$$A_{eff} = t_w \cdot (b_{1,edge} + b_{3,edge}) = 0,012 \cdot (0,206 + 0,06128) = 6,415 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Redukovaná tloušťka stěny:

$$t_{w,red} = t_w \cdot \rho_c = 12 \cdot 0,693 = 8,316 \text{ mm}$$

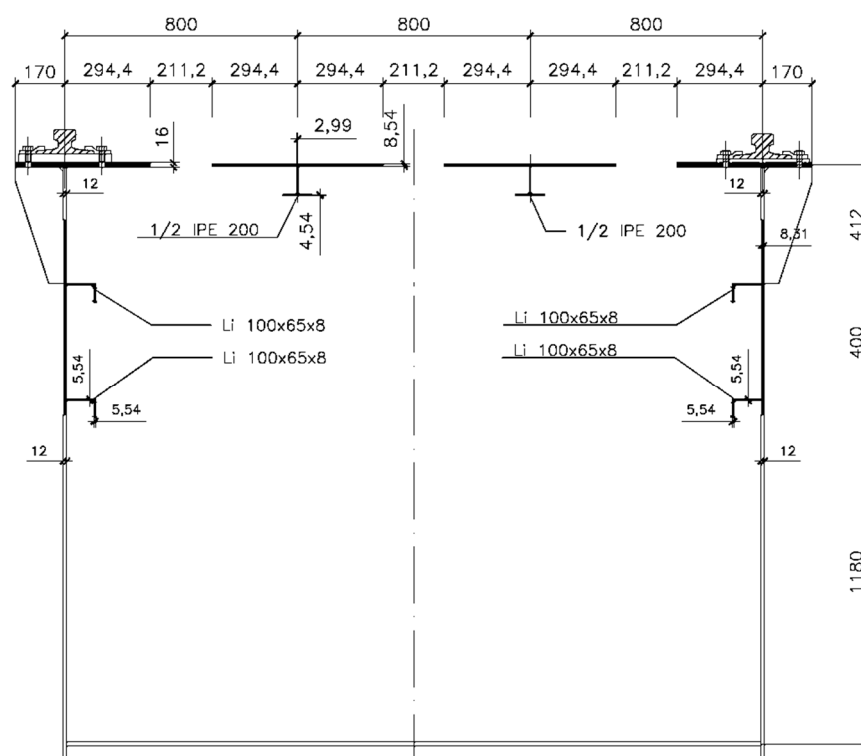
Redukovaná tloušťka výztuhy:

$$t_{w,sl,red} = t_{w,sl} \cdot \rho_c = 8 \cdot 0,693 = 5,544 \text{ mm}$$



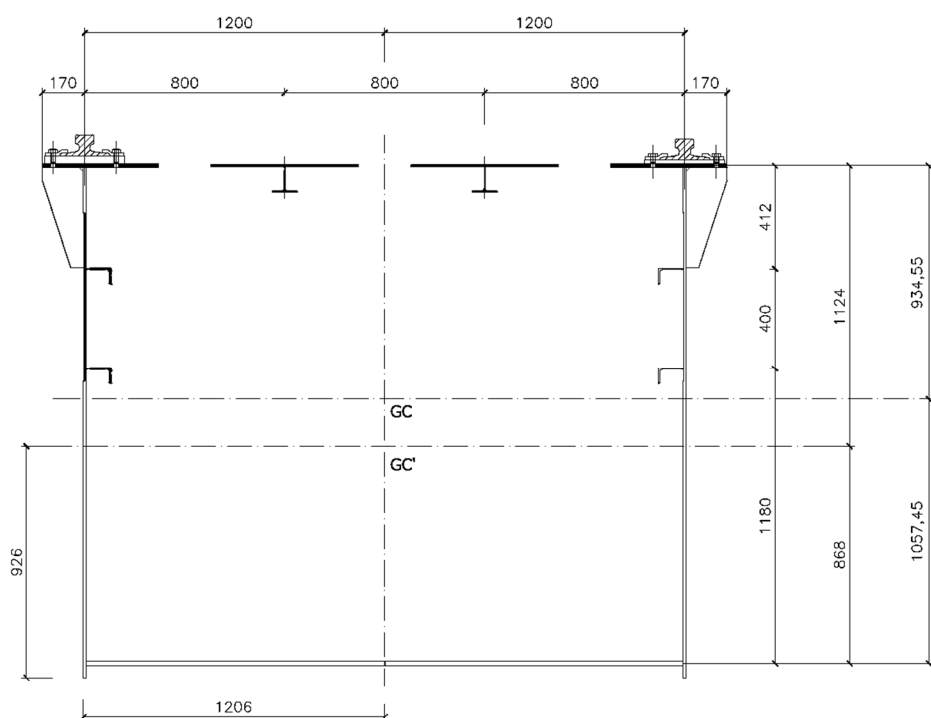
Obr. 168: Redukovaný účinný průřez části tlačené stěny

Průřezové charakteristiky efektivního účinného průřezu



Obr. 169: Redukovaný účinný průřez

Hlavní průřezové charakteristiky nosníku jsou stanoveny pomocí software Scia Engineer, kdy počátek souřadné soustavy je umístěn do levého dolního rohu.



Obr. 170: Poloha těžiště redukovaného průřezu

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,10127 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 935 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 1992 - 935 = 1057 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,10127}{0,935} = 0,1083 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,10127}{1,057} = 0,0958 \text{ m}^3$$

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{eff} = 0,1124 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0786 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 1124 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 1992 - 1124 = 868 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0786}{1,124} = 0,0699 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0786}{0,868} = 0,091 \text{ m}^3$$

$$h_{left} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{z,eff,top} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,1078}{1,200} = 0,0898 \text{ m}^3$$

Dle předpisu v [8] přílohy A.2.1 (4) je zapotřebí zkontrolovat, zdali není potřeba provést další redukci plochy s ohledem na splnění požadavku limity hodnoty napětí v krajních vláknech průřezu.

Průměrné napětí v horní tlačené pásnici

$$\sigma_{y,com,Ed,top} = \frac{M_{y,Ed,top}}{I_{y,eff}} \cdot h_{top} = \frac{9,033}{0,0786} \cdot 1,124 = 129,17 \text{ MPa}$$

$$\rho_c \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,534 \cdot \frac{355}{1,15} = 164,84 \text{ MPa} > \sigma_{y,com,Ed,top} = 129,17 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna, v případě nesplnění podmínky, by se musela účinná plocha modifikovat vztahem:

$$A_{c,eff,loc} = \frac{\rho_c \cdot f_y \cdot A_{sl1}}{\sigma_{com,Ed} \cdot \gamma_{M1}} \quad (8)$$

kde A_{sl1} je průřezová plocha výztuhy a jejích přilehlých částí stěn, $\sigma_{com,Ed}$ je průměrné napětí stěny.

Průměrné napětí v místě první výztuhy v tlačené oblasti

$$\sigma_{y,com,Ed,top} = \frac{M_{y,Ed,top}}{I_{y,eff}} \cdot h_{w1} = \frac{9,033}{0,0786} \cdot 0,523 = 60,11 \text{ MPa}$$

$$\rho_c \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,693 \cdot \frac{355}{1,15} = 213,93 \text{ MPa} > \sigma_{y,com,Ed,top} = 60,11 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna.

Ohybová únosnost

$$M_{y,Rd,top} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,top} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0699 = 21,58 \text{ MNm}$$

$$M_{y,Rd,bottom} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,bottom} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,091 = 32,31 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{9,033}{21,58} = 0,419 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy y.

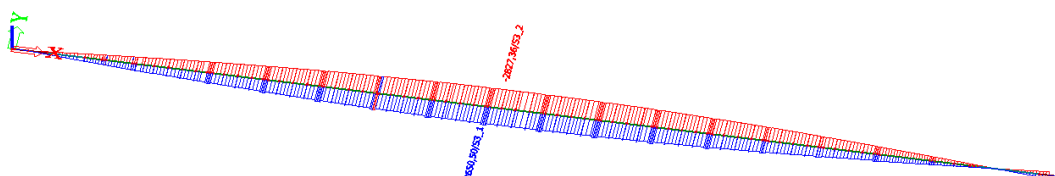
$$M_{y,Rd,top} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,gr,top} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0958 = 29,57 \text{ MNm}$$

Při porovnání s únosností v ohybu redukovaného účinného průřezu a původního průřezu dochází ke snížení ohybové únosnosti cca o **30 %**.

7.3.4 Posouzení prosté ohybové únosnosti (ohyb kolem osy z)

Maximální vnitřní síly S3_2:

$$M_{z,Ed,přisl} = 2,827 \text{ MNm}$$

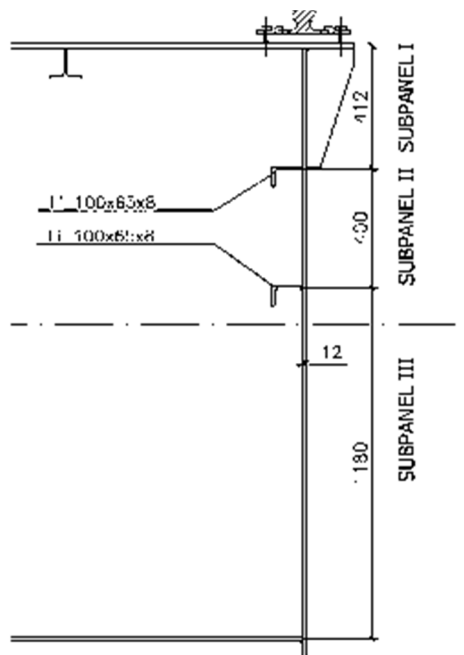


Obr. 171: Průběh ohybového momentu M_z

A) Vyztužená stěna s podélnými výztuhami

Účinné průřezové charakteristiky pro namáhání ohybovým momentem kolem osy z jsou stanoveny analogicky jako pro směr namáhání ohybovým momentem kolem osy y s tím rozdílem, že horní pásnice průřezu je tlačená i tažená, naopak stěna průřezu je celá rovnoměrně tlačená. U stěn vyztužených podélnými výztuhami je zapotřebí stanovit účinné plochy lokálního boulení části průřezu mezi výztuhami tzv. subpanelů a účinnou plochu celkového boulení pro vyztužený panel. Vzdálenost hlavních příčných výztuh v místě maximálního ohybového momentu $a = 2 \text{ m}$.

Výpočet účinné plochy subpanelů



Obr. 172: Tlačená část průřezu – stěna

Podélné výztuhy jsou třídy průřezu 1 a nemusí se jejich plocha redukovat s ohledem na lokální možnost boulení.

Subpanel I (část horní stěny na okraji)

$$b_1 = 412 \text{ mm}$$

$$A_1 = 412 \cdot 12 = 4944 \text{ mm}^2$$

Součinitel kritického napětí se stanoví dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5, lze předpokládat, že celá stěna je rovnoměrně tlačená, poměr napětí je tedy roven 1.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,00$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{412}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 0,743$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 0,743 \geq 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda}_{p2} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda}_{p2}^2} = \frac{0,743 - 0,055(3+1)}{0,743^2} = 0,947 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{1,eff} = b_1 \cdot \rho_1 = 412 \cdot 0,947 = 390,164 \text{ mm}$$

$$A_1 = A_1 \cdot \rho_1 = 4944 \cdot 0,947 = 4681,97 \text{ mm}^2$$

$$b_{1,edge,eff} = b_{1,edge} \cdot \rho_1 = 206 \cdot 0,947 = 195,08 \text{ mm}$$

Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 390,164 = 195,08 \text{ mm}$$

Subpanel II (část stěny mezi výztuhami)

$$b_2 = 400 \text{ mm}$$

$$A_2 = 400 \cdot 12 = 4800 \text{ mm}^2$$

$$\overline{\lambda_{p2}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{400/12}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 0,721$$

$$\overline{\lambda_{p2}} = 0,721 \geq 0,673$$

$$\rho_2 = \frac{\overline{\lambda_{p2}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p2}}^2} = \frac{0,721 - 0,055(3+1)}{0,721^2} = 0,964 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{2,eff} = b_2 \cdot \rho_2 = 400 \cdot 0,964 = 385,60 \text{ mm}$$

$$A_2 = A_2 \cdot \rho_2 = 4800 \cdot 0,964 = 4627,20 \text{ mm}^2$$

Efektivní šířka

$$b_{e1} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 385,60 = 192,80 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 385,60 = 192,80 \text{ mm}$$

Subpanel III (spodní část stěny)

$$b_3 = 1180 \text{ mm}$$

$$A_3 = 1180 \cdot 12 = 14160 \text{ mm}^2$$

$$\overline{\lambda_{p3}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{1180/12}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 2,128$$

$$\overline{\lambda_{p3}} = 2,128 \geq 0,673$$

$$\rho_3 = \frac{\overline{\lambda_{p3}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p3}}^2} = \frac{2,128 - 0,055(3+1)}{2,128^2} = 0,421 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

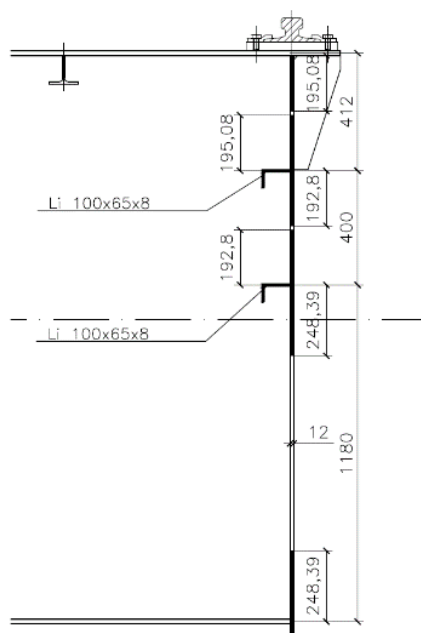
$$b_{3,eff} = b_3 \cdot \rho_3 = 1180 \cdot 0,421 = 496,78 \text{ mm}$$

$$A_3 = A_3 \cdot \rho_3 = 14160 \cdot 0,421 = 5961,36 \text{ mm}^2$$

$$b_{3,edge,eff} = b_{3,edge} \cdot \rho_3 = 590 \cdot 0,421 = 248,39 \text{ mm}$$

Efektivní šířka

$$b_{e3} = 0,5b_{eff} = 0,5 \cdot 496,78 = 248,39 \text{ mm}$$



Obr. 173: Efektivní účinný průřez stěny s vlivem lokálního boulení

Účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů (s výjimkou účinné části, která je podepřena krajní sousední pásnicí se šířkou $b_{1,edge,eff}$ a $b_{3,edge,eff}$) s vlivem lokálního boulení:

$$A_{c,eff,loc} = 1,250 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

V následujícím výpočtu je nutné stanovit kritické napětí pro celkové boulení vyztuženého panelu stěny.

Průřezová plocha s plnou efektivní plochou:

$$A_{sl} = 1,686 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti s plnou efektivní plochou:

$$I_{sl,z} = 1,395 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Poloměr setrvačnosti kolem hlavní osy y:

$$i_{sl,z} = \sqrt{\frac{I_{sl,z}}{A_{sl}}} = \sqrt{\frac{1,395 \cdot 10^{-5}}{1,686 \cdot 10^{-2}}} = 0,0287 \text{ m}$$

Kritické prutové napětí pro vyztuženou stěnu:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 1,395 \cdot 10^{-5}}{1,686 \cdot 10^{-2} \cdot 2^2} = 428,72 \text{ MPa}$$

Kritické stěnové napětí pro vyztuženou stěnu:

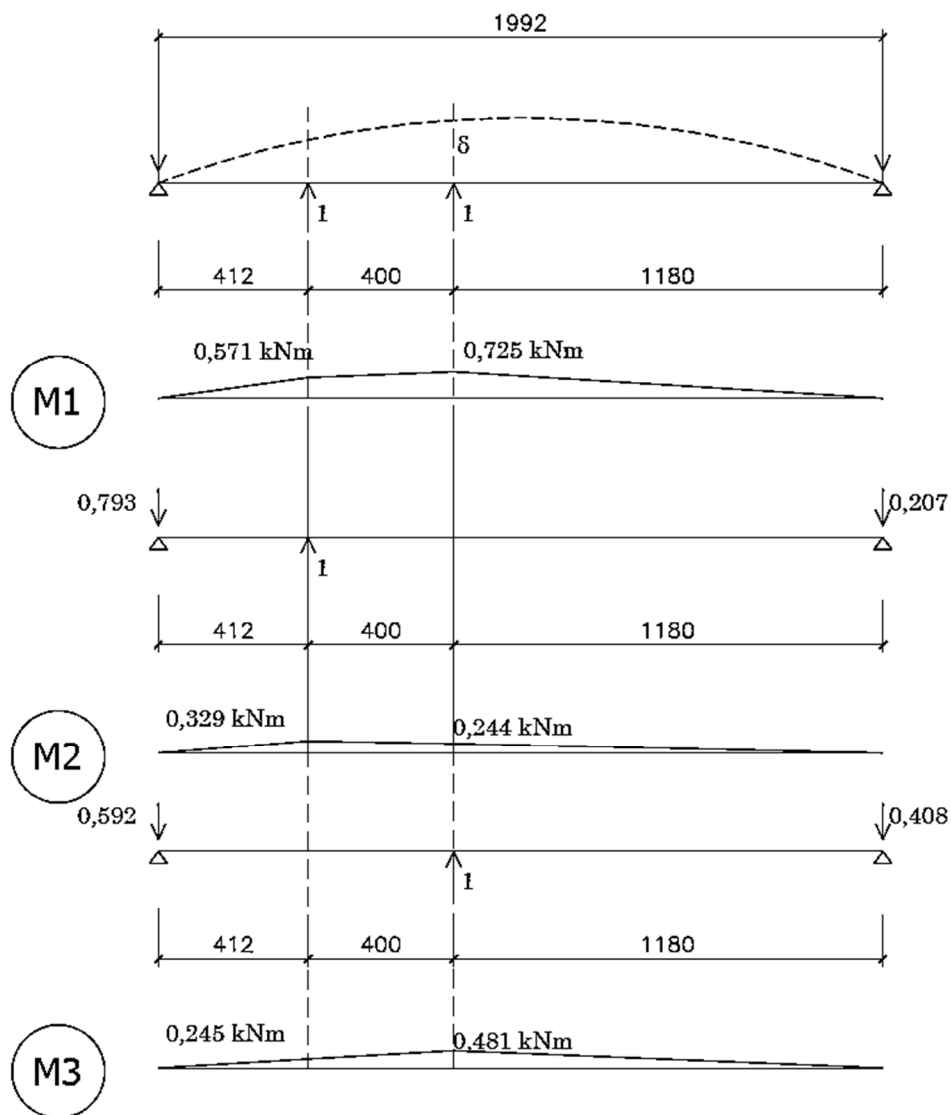
Kritické stěnové napětí pro vyztuženou stěnu průřezu je stanoveno pomocí Engesserova řešení stanovení pérové tuhosti v místech podélných výztuh stěny.

Stanovení pérové tuhosti

Předpokladem je, že obě výztuhy vybočí současně a tuhost se koncentruje do polohy těžiště jednotlivých výztuh.

Ohybová tuhost 1 m širokého pásu stěny:

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{210 \cdot 10^3 \cdot 0,012^3}{12(1 - 0,3^2)} = 0,0332 \text{ MNm}$$



Obr. 174: Průběh momentů pro zjištění pérové konstanty

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_1 &= \frac{1}{3} \cdot 0,571 \cdot 0,329 \cdot 0,412 + \frac{1}{3} \cdot 1,18 \cdot 0,725 \cdot 0,244 \\ &\quad + \frac{1}{6} [0,571 \cdot (2 \cdot 0,329 + 0,244) + 0,725 \cdot (2 \cdot 0,244 + 0,329)] \\ &= 0,280\end{aligned}$$

$$\delta_1 = \frac{\bar{\delta}_1}{D} = \frac{0,280}{0,0332} = 8,433 \text{ m}^2/\text{MN}$$

Pérová tuhost:

$$k = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{8,433} = 0,119 \text{ MN}/\text{m}^2$$

$$\begin{aligned}\bar{\delta}_1 &= \frac{1}{3} \cdot 0,571 \cdot 0,245 \cdot 0,412 + \frac{1}{3} \cdot 1,18 \cdot 0,725 \cdot 0,481 \\ &\quad + \frac{1}{6} [0,571 \cdot (2 \cdot 0,245 + 0,481) + 0,725 \cdot (2 \cdot 0,481 + 0,245)] \\ &= 0,395\end{aligned}$$

$$\delta_1 = \frac{\bar{\delta}_1}{D} = \frac{0,395}{0,0332} = 11,898 \text{ } m^2 / MN$$

Pérová tuhost:

$$k = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{11,898} = 0,084 \text{ } MN / m^2$$

Plocha výztuhy:

$$A_{sl,1} = 6,099 \cdot 10^{-3} \text{ } m^2$$

$$A_{sl,2} = 1,076 \cdot 10^{-2} \text{ } m^2$$

Moment setrvačnosti s plnou efektivní plochou:

$$I_{sl,y,1} = 6,733 \cdot 10^{-6} \text{ } m^4$$

$$I_{sl,y,2} = 7,019 \cdot 10^{-6} \text{ } m^4$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy v libovolném počtu sinusových polovin se stanoví dle vztahu

$$N_{cr1} = \frac{\pi^2 E I_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{k a^2}{m^2 \pi^4 E I_{sl}} \right) \quad (9)$$

kde m je počet polovin, a vzdálenost hlavních příčných výztuh a $I_{sl,i}$ moment setrvačnosti jedné výztuhy.

$$E I_{sl,1} = 210 \cdot 10^3 \cdot 6,733 \cdot 10^{-6} = 1,414 \text{ } MNm^2$$

$$E I_{sl,2} = 210 \cdot 10^3 \cdot 7,019 \cdot 10^{-6} = 1,474 \text{ } MNm^2$$

Kritická pružná síla pro vybočení horní výztuhy v jedné sinusové polovině:

$$N_{cr1} = \frac{\pi^2 E I_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{k a^2}{m^2 \pi^4 E I_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 1,414}{2^2} \left(1^2 + \frac{0,119 \cdot 2^2}{1^2 \pi^4 \cdot 1,414} \right) = 3,50 \text{ } MN$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy ve dvou sinusových polovlnách:

$$N_{cr2} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 1,414}{2^2} \left(2^2 + \frac{0,119 \cdot 2^2}{2^2 \pi^4 \cdot 1,414} \right) = 13,95 \text{ MN}$$

Kritická pružná síla pro vybočení spodní výztuhy v jedné sinusové polovlně:

$$N_{cr1} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 1,474}{2^2} \left(1^2 + \frac{0,084 \cdot 2^2}{1^2 \pi^4 \cdot 1,474} \right) = 3,65 \text{ MN}$$

Kritická pružná síla pro vybočení výztuhy ve dvou sinusových polovlnách:

$$N_{cr2} = \frac{\pi^2 EI_{sl,i}}{a^2} \left(m^2 + \frac{ka^2}{m^2 \pi^4 EI_{sl}} \right) = \frac{\pi^2 \cdot 1,474}{2^2} \left(2^2 + \frac{0,084 \cdot 2^2}{2^2 \pi^4 \cdot 1,474} \right) = 14,55 \text{ MN}$$

Kritické stěnové napětí při vybočení v jedné polovlně:

$$\sigma_{cr,p} = \frac{N_{cr1}}{A_{sl,1}} = \frac{3,50}{0,006099} = 573,86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{cr,p} = \frac{N_{cr2}}{A_{sl,5}} = \frac{3,65}{0,01076} = 339,22 \text{ MPa}$$

O vyboulení panelu rozhoduje spodní výztuha, jelikož dle výpočtu se stanovila hodnota kritického napětí pro vybočení panelu v místě výztuhy spodní mnohem menší než v místě výztuhy horní.

Pro srovnání je zde uveden výpočet kritického pružného napětí dle přílohy A2 normy ČSN EN 1993-1-5. Pomocí tohoto výpočtu lze stanovit hodnotu kritického napětí stěny, výsledek je ale konzervativní a přibližný, proto je lepší pro podobné pásnice použít postup uvedený výše.

Horní výztuha

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_1 = \frac{3 - 1}{5 - 1} \cdot 412 = 206 \text{ mm}$$

$$b_{2,sup} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2 = \frac{2}{5 - 1} \cdot 400 = 200 \text{ mm}$$

Spodní výztuha

$$b_{2,inf} = \frac{3 - \psi_2}{5 - \psi_2} \cdot b_1 = \frac{3 - 1}{5 - 1} \cdot 400 = 200 \text{ mm}$$

$$b_{3,inf} = \frac{2}{5 - \psi_2} \cdot b_2 = \frac{2}{5 - 1} \cdot 1180 = 590 \text{ mm}$$

Průřezové charakteristiky jednotlivých výztuh včetně přilehlých částí pásnice

Průřezové charakteristiky výztuh včetně spolupůsobících částí stěny průřezu jsou odečteny ze software Scia Engineer.

Výztuha

Průřezová plocha výztuhy I:

$$A_{sl,1} = 6,099 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru y od střednice pásnice:

$$x_{sl} = 15 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,y,1} = 6,733 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Průřezová plocha výztuhy II:

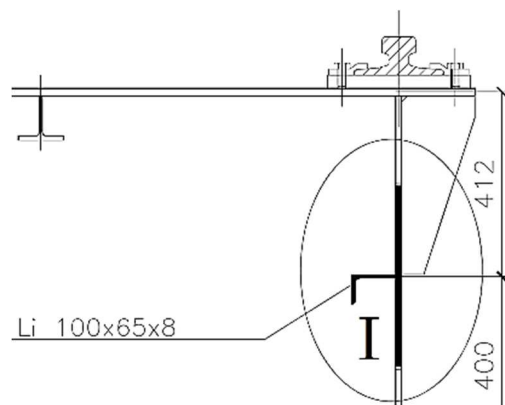
$$A_{sl,2} = 1,076 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru y od střednice pásnice:

$$x_{sl} = 9 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,y,2} = 7,019 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



Obr. 175: Účinný průřez horní výztuhy stěny průřezu

Průřezové charakteristiky sloučené výztuhy

Průřezová plocha sloučené výztuhy:

$$A_{sl,lumped} = A_{sl,I} + A_{sl,II} = 1,076 \cdot 10^{-2} + 6,099 \cdot 10^{-3} = 0,0169 \text{ m}^2$$

Moment setrvačnosti sloučené výztuhy kolem osy z:

$$I_{sl,lumped} = I_{sl,II} + I_{sl,I} = 7,019 \cdot 10^{-6} + 6,733 \cdot 10^{-6} = 1,375 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$W_{z,gr,top} = \frac{I_{z,gr}}{h_{top}} = \frac{0,1231}{0,996} = 0,124 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{top} = \sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{W_{z,top}} = \frac{2827 \cdot 10^3}{0,124} \cdot 10^{-6} = 22,80 \text{ MPa}$$

Síla ve výztuže:

$$F_{sl,I} = F_{sl,II} = A_{sl,I} \cdot \sigma_{sl1} = 1,690 \cdot 10^{-2} \cdot (-22,80) \cdot 10^6 = -385,32 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Umístění výslednice sil jednotlivých výztuh (z momentové podmínky k střednici stěny):

$$h_{f,lumped} \cdot (F_{sl,I} + F_{sl,II}) = F_{sl,I} \cdot h_{f1} + F_{sl,II} \cdot h_{f2}$$

$$h_{f,lumped} = \frac{F_{sl,I} \cdot h_{f1} + F_{sl,II} \cdot h_{f2}}{F_{sl,I} + F_{sl,II}} = \frac{385,32 \cdot 1,58 + 385,32 \cdot 1,18}{385,32 + 385,32} = 1,38 \text{ m}$$

Kritické pružné napětí stěny

Kritické pružné napětí stěny se stanoví jako nejmenší vypočítaná hodnota z případů – vybočení horní výztuhy, vybočení spodní výztuhy a vybočení sloučené výztuhy.

Vybočení první výztuhy

$$b_{I1}^* = 0,412 \text{ m}$$

$$b_{I2}^* = 0,400 \text{ m}$$

$$B_I^* = b_{I2}^* + b_{I1}^* = 0,412 + 0,400 = 0,812 \text{ m}$$

$$a_{c,I} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}{t_f^3 B_I^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{6,733 \cdot 10^{-6} \cdot 0,412^2 \cdot 0,4^2}{0,012^3 \cdot 0,812}} = 2,60 \text{ m} \geq a = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_f^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 6,733 \cdot 10^{-6}}{6,099 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} \\ &\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 0,812 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 6,099 \cdot 10^{-3} \cdot 0,412^2 \cdot 0,4^2} = 770,08 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Vybočení druhé výztuhy

$$b_{I1}^* = 0,812 \text{ m}$$

$$b_{I2}^* = 1,18 \text{ m}$$

$$B_I^* = b_{I2}^* + b_{I1}^* = 1,18 + 0,812 = 1,992 \text{ m}$$

$$a_{c,I} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}{t_f^3 B_I^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{7,019 \cdot 10^{-6} \cdot 0,812^2 \cdot 1,18^2}{0,012^3 \cdot 1,992}} = 5,06 \text{ m} \geq a = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_f^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 7,019 \cdot 10^{-6}}{1,076 \cdot 10^{-2} \cdot 2^2} \\ &\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 1,992 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 1,076 \cdot 10^{-2} \cdot 0,812^2 \cdot 1,18^2} = 346,15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Vybočení sloučené výztuhy

$$b_{lumped1}^* = 1,38 \text{ m}$$

$$b_{lumped2}^* = 0,612 \text{ m}$$

$$B_{lumped}^* = b_{lumped1}^* + b_{lumped2}^* = h_w = 0,612 + 1,38 = 1,992 \text{ m}$$

$$a_{c,lumped} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,II} b_{II1}^{*2} b_{II2}^{*2}}{t_w^3 B_{II}^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{1,375 \cdot 10^{-5} \cdot 1,38^2 \cdot 0,612^2}{0,012^3 \cdot 1,992}} = 5,63 \text{ m} > a$$

$$= 2 \text{ m}$$

$$\sigma_{cr,sl,lumped} = \frac{\pi^2 E I_{sl,II}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}$$

$$= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 1,375 \cdot 10^{-5}}{0,0169 \cdot 2^2} + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,012^3 \cdot 1,992 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 0,0169 \cdot 0,612^2 \cdot 1,38^2} = 428,25 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p} = \min\{\sigma_{cr,plumped}, \sigma_{cr,pI}, \sigma_{cr,pII}\} = \min\{770,08; 346,15; 428,25\} \cdot 10^6$$

$$= 346,15 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Stanovení jednotlivých štíhlostí pro prutové a stěnové chování panelu

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_{sl}} = \frac{1,250 \cdot 10^{-2}}{1,686 \cdot 10^{-2}} = 0,741$$

Poměrná stěnová štíhlost ekvivalentní stěny:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,741 \cdot 355}{339,22}} = 0,8806 \geq 0,673$$

$$\rho_p = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,8806 - 0,055(3 + 1)}{0,8806^2} = 0,852$$

Poměrná prutová štíhlost

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,741 \cdot 355}{428,72}} = 0,783 \geq 0,673$$

$$\rho_c = \frac{\bar{\lambda}_c - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_c^2} = \frac{0,677 - 0,055(3 + 1)}{0,677^2} = 0,997$$

Vzdálenost těžiště vyztuženého pásu (plné výztuhy):

$$e = 9 \text{ mm}$$

Hodnoty jsou odečteny ze software Scia Engineer a jsou vztaženy ke střednici horního pásu.

Vzdálenost těžiště plné výztuhy:

$$e = 11 \text{ mm}$$

Vzdálenost těžiště efektivního vyztuženého pásu:

$$e = 15 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi těžištěm výztuhy a těžištěm vyztuženého pásu:

$$e = 73 - \min e = 73 - 11 = 62 \text{ mm}$$

Poloměr setrvačnosti vyztuženého pásu kolem hlavní osy z:

$$i_{sl,y} = 0,029 \text{ m}$$

Jedná se o otevřené výztuhy, součinitel imperfekce je pro křivku c $\alpha = 0,49$

Zvýšení součinitele imperfekce (pro vyztužené stěny) na základě normy ČSN EN 1993-1-5:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{29/62} = 0,682$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,5 [1 + 0,682(0,783 - 0,2) + 0,783^2] = 1,005$$

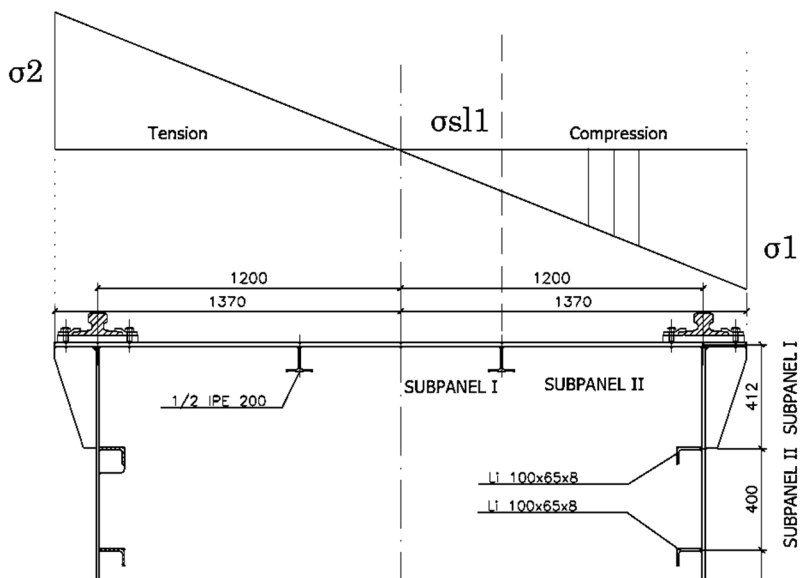
Součinitel vzpěrnosti prutu:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{1,005 + \sqrt{1,005^2 - 0,783^2}} = 0,611$$

I

B) Vyztužená pásnice průřezu s podélnými výztuhami

Výztuhy pásnice 1/2 IPE200 jsou třídy průřezu 1 a nemusí se jejich plocha redukovat s ohledem na lokální možnost boulení.



Obr. 177: Vyšetřovaná část průřezu – horní pásnice

Subpanel I

$$b_1 = 400 \text{ mm}$$

$$A_1 = 400 \cdot 16 = 6400 \text{ mm}^2$$

Součinitel kritického napětí se stanoví pro vnitřní tlačnou část stěny průřezu dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_{sl,1}} = \frac{1200 - 2400}{1200 - 400} = -1,5$$

$$k_\sigma = 5,98(1 - \psi)^2 = 5,98(1 - (-1,5))^2 = 37,375$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{400/16}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{37,375}} = 0,177$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 0,177 \leq 0,673$$

$$\rho_1 = 1,00$$

$$b_{1,eff,sup} = 0,4 \cdot b_1 \cdot \rho_1 = 0,4 \cdot 400 \cdot 1,00 = 160 \text{ mm}$$

Působící napětí v průřezu:

$$W_{z,gr,top} = \frac{I_{z,gr}}{h_{top}} = \frac{0,1231}{0,996} = 0,124 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{top} = \sigma_1 = \frac{M_{z,Ed}}{W_{z,top}} = \frac{2827 \cdot 10^3}{0,124} \cdot 10^{-6} = 22,80 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sl,1} = \frac{\sigma_1}{1,200} \cdot (1,200 - 0,8) = \frac{22,80}{1,200} \cdot (1,200 - 0,800) = 7,6 \text{ MPa}$$

Průřezové charakteristiky jednotlivých výztuh včetně přilehlých částí pásnice

Průřezové charakteristiky výztuh včetně spolupůsobících částí stěny průřezu jsou odečteny ze software Scia Engineer.

Horní výztuha

Průřezová plocha výztuhy I:

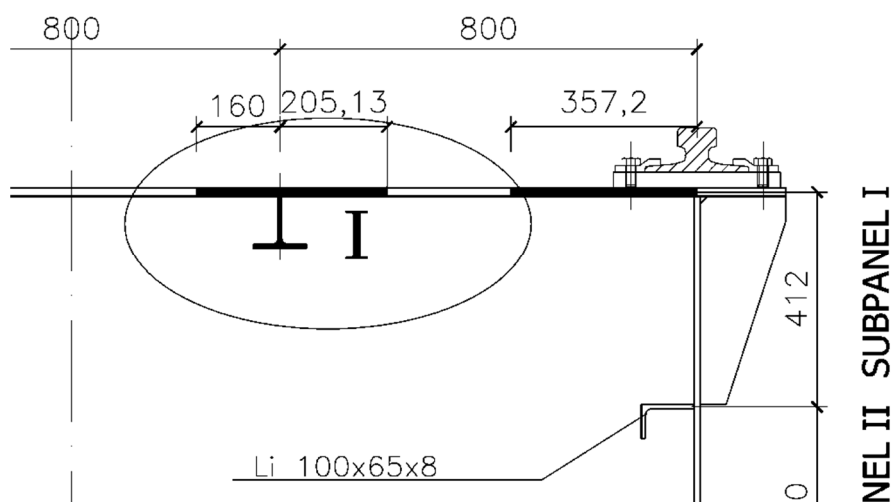
$$A_{sl,I} = 7,292 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od z od vnější hrany pásnice:

$$x_{sl,I} = 25 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,I} = 9,707 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$



Obr. 179: Účinný průřez horní výztuhy

Kritické pružné napětí stěny

Kritické pružné napětí stěny se stanoví jako hodnota napětí při vybočení výztuhy v tlačené oblasti průřezu.

Vybočení horní výztuhy

$$b_{I1}^* = 0,800 \text{ m}$$

$$b_{I2}^* = 0,400 \text{ m}$$

$$B_I^* = b_{I2}^* + b_{I1}^* = 0,400 + 0,800 = 1,200 \text{ m}$$

$$a_{c,I} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,I} b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}}{t_w^3 B_I^*}} = 4,33 \sqrt[4]{\frac{9,707 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4^2 \cdot 0,8^2}{0,016^3 \cdot 1,200}} = 2,90 \text{ m} \geq a = 2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cr,sl,I} &= \frac{\pi^2 E I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} + \frac{E \cdot t_w^3 \cdot B_I^* \cdot a^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - \nu^2) \cdot A_{sl,I} \cdot b_{I1}^{*2} b_{I2}^{*2}} \\ &= \frac{\pi^2 210 \cdot 10^9 \cdot 9,707 \cdot 10^{-6}}{7,292 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} \\ &\quad + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,016^3 \cdot 1,20 \cdot 2^2}{4 \cdot \pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 7,292 \cdot 10^{-3} \cdot 0,400^2 \cdot 0,800^2} \\ &= 843,67 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_{cr,p,I} = \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl,I} = \frac{1,200}{1,200 - 0,800} \cdot 843,67 \cdot 10^6 = 2531,01 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

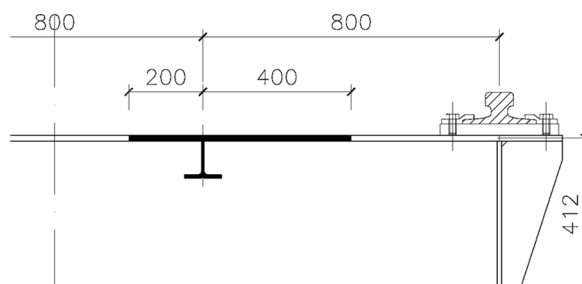
Stěnové chování

V tlačené oblasti pásnice průřezu dochází k lokálnímu boulení a projeví se lokální stabilitní jevy.

Šířka spolupůsobící desky:

$$b_{1,edge} = \frac{b_1}{2} = \frac{800}{2} = 400 \text{ mm}$$

$$b_{3,edge} = \frac{b_1}{2} = \frac{400}{2} = 200 \text{ mm}$$



Obr. 180: Účinná průřezová plocha pásnice v tlačené oblasti

Průřezové charakteristiky (odečteny ze software Scia Engineer)

Účinná průřezová plocha všech výztuh a subpanelů (s výjimkou účinné části, která je podepřená krajní sousední stěnou a vedle tažené části pásnice se šířkou $b_{1,edge}$ a $b_{2,edge}$):

$$A_{c,eff,loc} = 7,292 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Průřezová plocha s plnou efektivní plochou:

$$A_{sl} = 1,105 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Stanovení jednotlivých štíhlostí pro stěnové chování panelu:

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_{sl}} = \frac{7,292 \cdot 10^{-3}}{1,105 \cdot 10^{-2}} = 0,660$$

Poměrná stěnová štíhlost ekvivalentní stěny:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,660 \cdot 355}{2531,01}} = 0,304 \leq 0,673$$

$$\rho_p = 1,00$$

Prutové chování

Stanoví se pro výztuhu horní, jelikož je více tlačení než výztuha v nižší pozici tlačené oblasti. Průřezové charakteristiky výztuhy již byly stanoveny v případě výpočtu kritického pružného napětí stěny.

Průřezová plocha výztuhy I:

$$A_{sl,I} = 1,492 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vzdálenost těžiště ve směru od y od vnější hrany pásnice:

$$z_{sl,I} = 99 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy I kolem osy z:

$$I_{sl,I} = 7,134 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Pružné kritické prutové napětí pro výztuhu:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{sl,I}}{A_{sl,I} \cdot a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 7,134 \cdot 10^{-7}}{1,492 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2} = 247,756 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Pružné kritické prutové napětí

$$\sigma_{cr,c} = \frac{b_c}{b_{sl,1}} \cdot \sigma_{cr,sl} = \frac{1,200}{1,200 - 0,800} \cdot 247,756 \cdot 10^6 = 743,268 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

Poměrná prutová štíhlost

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,660 \cdot 355}{743,268}} = 0,561 \leq 0,673$$

$$\rho_c = 1,00$$

Poloměr setrvačnosti kolem hlavní osy z:

$$i_{sl,z} = \sqrt{\frac{I_{sl,z}}{A_{sl}}} = \sqrt{\frac{7,134 \cdot 10^{-7}}{1,492 \cdot 10^{-3}}} = 0,022 \text{ m}$$

Vzdálenost těžiště od střednice stěny:

$$e_2 = 10 \text{ mm}$$

Vzdálenost těžiště samotné výztuhy od střednice stěny:

$$e_1 = 91 \text{ mm}$$

$$e = \max\{e_1; e_2\} = \max\{10; 91\} = 91 \text{ mm}$$

Stěna průřezu je dostatečně tuhá a dle výpočtu lze předpokládat, že nebude docházet k vybočení celého panelu.

Zvýšení součinitele imperfekce (pro vyztužené stěny) na základě normy ČSN EN 1993-1-5:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{22/91} = 0,862$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] = 0,5 [1 + 0,862(0,561 - 0,2) + 0,561^2] = 0,813$$

Součinitel vzpěrnosti prutu:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} = \frac{1}{0,813 + \sqrt{0,813^2 - 0,561^2}} = 0,714$$

Interakce mezi stěnovým a prutovým chováním:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} = \frac{2531,01}{743,268} - 1 = 2,405 \geq 1,00$$

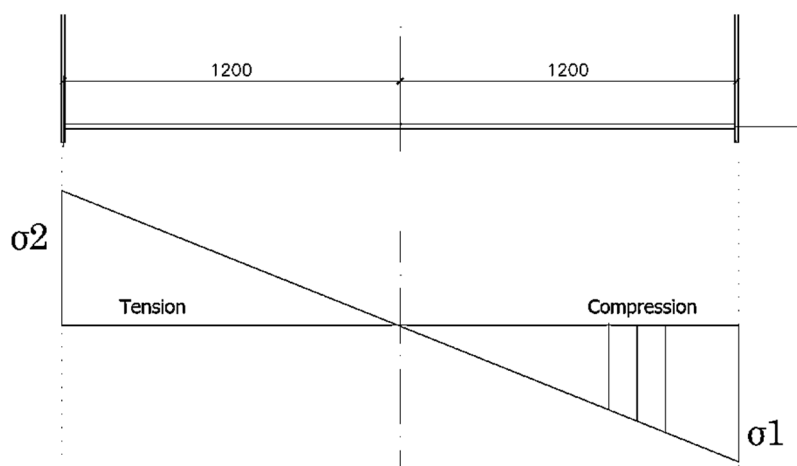
$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c = (1,0 - 0,714) \cdot 1,00 \cdot (2 - 1,00) + 0,714 = 1,00$$

Efektivní plocha tlačené části stěny průřezu

Snížení plochy součinitelem boulení je uvažováno jako jednotná redukce. Podle výpočtu součinitele boulení v interakci pro stěnové a pro deskové boulení tlačené pásnice průřezu nedochází k redukci tloušťky pásnice.

C) Spodní pásnice průřezu

Část spodní pásnice průřezu je tlačená, musí se zohlednit možnost boulení průřezu.



Obr. 181: Průřez a namáhání spodní pásnice nosníku

Součinitel kritického napětí se stanoví pro vnitřní tlačnou část stěny průřezu dle tabulky 4.1 normy ČSN EN 1993-1-5.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_{sl,1}} = \frac{1200 - 2400}{1200} = -1,00$$

$$k_\sigma = 23,90$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{2400/16}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{23,90}} = 1,328$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 1,328 \leq 0,673$$

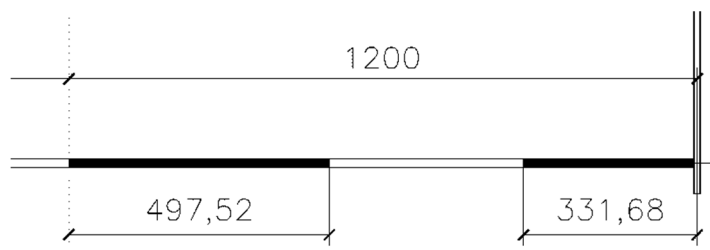
$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda}_{p1} - 0,055(3 + \psi)}{\overline{\lambda}_{p1}^2} = \frac{1,328 - 0,055(3 - 1,00)}{1,328^2} = 0,691$$

Stanovení účinné šířky:

$$b_{eff} = \rho_1 \cdot b = 0,691 \cdot 1200 = 829,20 \text{ mm}$$

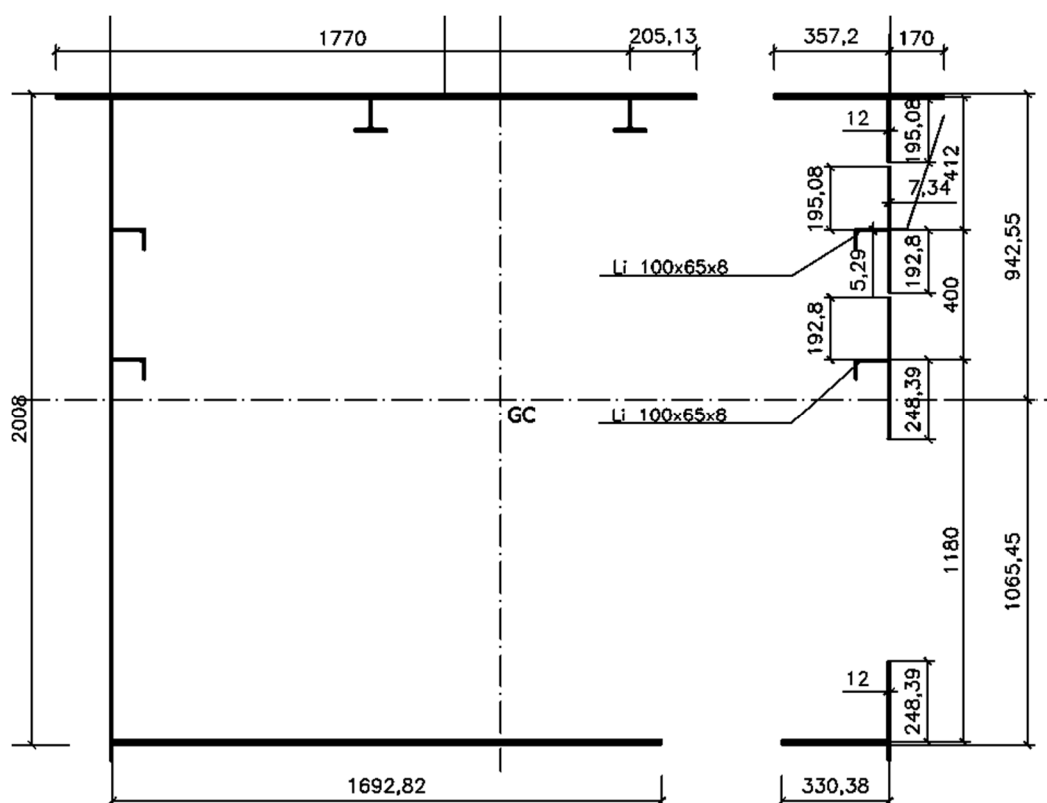
$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 829,20 = 331,68 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 829,20 = 497,52 \text{ mm}$$



Obr. 182: Účinná část tlačené spodní pásnice průřezu

Průřezové charakteristiky efektivního účinného průřezu



Obr. 183: Redukovaný účinný průřez

Hlavní průřezové charakteristiky nosníku jsou stanoveny pomocí software Scia Engineer, kdy počátek souřadné soustavy je umístěn do levého dolního rohu.


$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

$$I_{z,gr} = 0,1231 \text{ m}^4$$

$$h_{left} = h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{z,gr,left} = W_{z,gr,right} = \frac{I_{z,gr}}{h_{left}} = \frac{0,1231}{1,200} = 0,103 \text{ m}^3$$

$$A_{eff} = 0,1103 \text{ m}^2$$

$$I_{z,eff} = 0,0826 \text{ m}^4$$

$$h_{left} = 1056 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1342 \text{ mm}$$

$$W_{z,eff,left} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0826}{1,056} = 0,0782 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{right}} = \frac{0,0826}{1,342} = 0,0615 \text{ m}^3$$

$$I_{y,eff} = 0,0926 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 886 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 1106 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0926}{0,886} = 0,104 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0905}{1,112} = 0,0833 \text{ m}^3$$

Dle předpisu v [8] přílohy A.2.1 (4) je zapotřebí zkontrolovat, zdali není potřeba provést další redukci plochy s ohledem na splnění požadavku:

Průměrné napětí v horní tlačené pásnici

$$\sigma_{z,com,Ed,top} = \frac{M_{z,Ed,top}}{I_{z,eff}} \cdot h_{right} = \frac{2,827}{0,0826} \cdot 1,342 = 45,93 \text{ MPa}$$

$$\rho_c \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,784 \cdot \frac{355}{1,15} = 242,02 \text{ MPa} > \sigma_{y,com,Ed,top} = 45,93 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna.

Ohybová únosnost

$$M_{z,Rd,top} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,right} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0615 = 18,98 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Rd,left} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,left} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0782 = 24,14 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{2,827}{18,98} = 0,150 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy z.

$$M_{z,Rd,top} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,gr,top} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,103 = 31,80 \text{ MNm}$$

Při porovnání s únosností v ohybu redukovaného účinného průřezu a původního průřezu dochází ke snížení ohybové únosnosti cca o **40 %**.

7.3.5 Posouzení ztráty příčné a torzní stability

Maximální vnitřní síly S2_3:

$$M_{y,Edmax} = 9,033 \text{ MNm}$$

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,10127 \text{ m}^4$$

$$I_{z,gr} = 0,1231 \text{ m}^4$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,10127}{0,935} = 0,1083 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,10127}{1,057} = 0,0958 \text{ m}^3$$

$$I_t = 0,1368 \text{ m}^4$$

$$I_w = 2,724 \cdot 10^{-4} \text{ m}^6$$

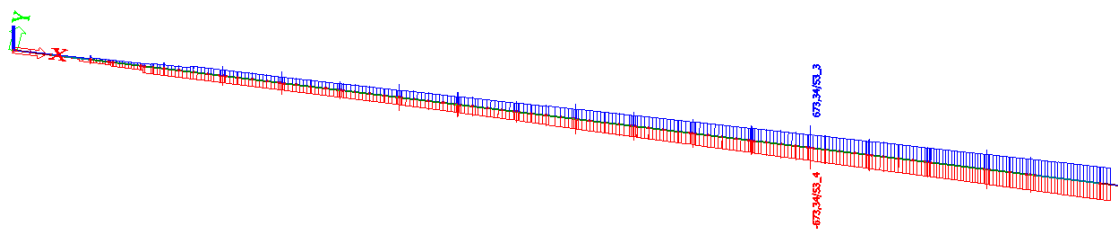
Výpočet klopení

Jedná se o uzavřený průřez – klopení lze zanedbat.

7.3.6 Posouzení únosnosti průřezu v tahu

Maximální vnitřní síly S2_3:

$$N_{Edmax} = 0,673 \text{ MN}$$



Obr. 185: Průběh normálové síly N

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

Únosnost v tahu

$$N_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,13901 = 42,91 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,673}{42,91} = 0,016 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tahem.

7.3.7 Posouzení únosnosti průřezu v tlaku

V kapitole 7.3.5 a dalších při výpočtu průřezových charakteristik bylo ověřeno, že u daného průřezu nedochází k ovlivnění průběhu napětí horní pásnice v důsledku smykového ochabnutí, proto není potřeba efektivní plochu průřezu redukovat.

Je ale zapotřebí stanovit účinné průřezové charakteristiky pro namáhání tlakem tedy pro celý tlačný průřez. Při posuzování namáhání konstrukce ohybovým momentem kolem osy y se již vyšetřilo boulení horní pásnice průřezu při namáhání rovnoměrným tlakem, obdobně u stanovení průřezových charakteristik pro namáhání ohybovým momentem kolem osy z se stanovily efektivní účinné charakteristiky stěny průřezu, která byla namáhána rovnoměrným konstantním tlakovým napětím vyvozeným ohybovým momentem M_z . Nyní postačí stanovit efektivní šířky spodní pásnice při namáhání tlakem.

Maximální vnitřní síly S2_4::

$$N_{Edmax} = -0,673 \text{ MN}$$

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,13901 \text{ m}^2$$

$$i_{y,gr} = 853 \text{ mm}$$

$$i_{z,gr} = 941 \text{ mm}$$

Stanovení efektivní šířky spodní pásnice

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,00$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = \frac{\overline{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{2400}{16}}{28,4 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}\sqrt{4}} = 3,256$$

$$\overline{\lambda}_{p1} = 3,256 \geq 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\overline{\lambda}_{p1} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda}_{p1}^2} = \frac{3,256 - 0,055(3+1)}{3,256^2} = 0,286 \dots (3 + \psi) = (3 + 1) = 4 \geq 1,0$$

$$b_{eff} = \rho_1 \cdot b = 0,286 \cdot 2400 = 686,40 \text{ mm}$$

Účinná šířka

$$b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 686,40 = 343,20 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 686,40 = 343,20 \text{ mm}$$

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{eff} = 0,0651 \text{ m}^2$$

$$I_{z,eff} = 0,0725 \text{ m}^4$$

$$h_{left} = 1200 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{z,eff,left} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0725}{1,200} = 0,0604 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{right}} = \frac{0,0725}{1,200} = 0,0604 \text{ m}^3$$

$$I_{y,eff} = 0,0441 \text{ m}^4$$

$$h_{eff,top} = 707 \text{ mm}$$

$$h_{eff,bottom} = 1285 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0441}{0,707} = 0,062 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0441}{1,285} = 0,034 \text{ m}^3$$

Výpočet součinitele vzpěrnosti pro celý tlačný průřez

Předpokládá se, že nosník je na obou stranách k vahadlům připojený pomocí přírubového spoje, který přenáší ohybové momenty a představuje vetknutý konec prutu pro vybočení ve směru osy z. Ve směru osy y se nosník chová jako nosník s prostým podepřením.

$$L_{cr,y} = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 37\,000 = 18\,500 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z (resp. kolmo k ose y)

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{18\,500}{853} = 21,69$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{21,69}{76,40} \sqrt{\frac{0,0651}{0,13901}} = 0,194 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{d} \quad \alpha = 0,76$$

$$\bar{\lambda}_1 = 0,194 \leq 0,200$$

$$\chi_y = 1,00 \leq 1,00 \quad \dots \text{ nedochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y (resp. kolmo k ose z)

$$L_{cr,z} = 37\,000 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{37\,000}{941} = 39,32$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{39,32}{76,40} \sqrt{\frac{0,0651}{0,13901}} = 0,352 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } \mathbf{d} \quad \alpha = 0,76$$

***Svařovaný průřez.**

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,352 - 0,2) + 0,352^2] = 0,620$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,620 + \sqrt{0,620^2 - 0,352^2}} = 0,884$$

$$\chi_z = 0,884 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěrná únosnost průřezu

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 1,00 \cdot 0,0651 = 20,09 \text{ MN}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,884 \cdot 0,0651 = 17,76 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,673}{17,76} = 0,038 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tlakem.

$$N_{b,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,139 = 42,91 \text{ MNm}$$

Při porovnání s únosností v tlaku redukovaného účinného průřezu a původního průřezu dochází ke snížení ohybové únosnosti cca o **54 %** bez zohlednění účinků vzpěru.

7.3.8 Posudek kombinace ohybového momentu a tlakové síly

A) Maximální ohybový moment kolem osy y

V místě maximálního ohybového momentu kolem osy y vzniká menší hodnota normálové tlakové síly v rozhodující kombinaci S2_3:

$$N_{Ed,přísl} = -0,321 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Edmax} = 9,033 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 1,338 \text{ MNm}$$

Konzervativně $k_{yy} = 1,00$

$$k_{zz} = 1,00$$

Do posudku kombinace ohybového momentu a tlakové síly se musí zohlednit účinek tlakové síly vůči novému těžišti pro efektivní průřez. Kombinace je provedena pro účinné průřezové charakteristiky stanovené pro namáhání průřezu samostatně tlakovou silou, ohybovým momentem.

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,z} = 0,321 \cdot 0,189 = 0,060 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,y} = 0,321 \cdot 0,049 = 0,016 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0651 = 20,10 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,884 \cdot 0,0651 = 17,76 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0699 = 21,58 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0615 = 18,98 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & = \frac{0,321}{20,10} + 1,00 \frac{9,033 + 0,060}{21,580} + 0,60 \frac{1,338 + 0,016}{18,98} = \\ & = 0,016 + 0,421 + 0,043 = 0,480 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & = \frac{0,321}{17,76} + 0,60 \frac{9,033 + 0,060}{21,580} + 1,00 \frac{1,338 + 0,016}{18,98} = \\ & = 0,018 + 0,253 + 0,072 = 0,343 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & = \frac{0,321}{20,10} + \frac{9,033 + 0,060}{21,580} + \frac{1,338 + 0,016}{18,98} = \\ & = 0,016 + 0,421 + 0,072 = 0,509 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

B) Maximální ohybový moment kolem osy z

Rozhodující kombinace S3_2:

$$N_{Ed,přisl} = 0,068 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přisl} = 5,508 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 2,827 \text{ MNm}$$

Konzervativně $k_{yy} = 1,00$

$$k_{zz} = 1,00$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,y} = 0,068 \cdot 0,189 = 0,013 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,z} = 0,068 \cdot 0,049 = 0,003 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0651 = 20,10 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,884 \cdot 0,0651 = 17,76 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0699 = 21,58 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0615 = 18,98 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & = \frac{0,068}{20,10} + 1,00 \frac{5,508 + 0,013}{21,58} + 0,60 \frac{2,827 + 0,003}{18,98} = \\ & = 0,003 + 0,256 + 0,089 = 0,348 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} =$$

$$= \frac{0,068}{17,76} + 0,60 \frac{5,508 + 0,013}{21,58} + 1,00 \frac{2,827 + 0,003}{18,98} =$$

$$= 0,004 + 0,154 + 0,148 = 0,306 \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$= \frac{0,068}{20,10} + \frac{5,508 + 0,013}{21,58} + \frac{2,827 + 0,003}{18,98} =$$

$$= 0,003 + 0,256 + 0,148 = 0,407 \leq 1,0$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

C) Maximální normálová síla

Rozhodující kombinace S3_4:

$$N_{Ed,max} = -0,673 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přísl} = 2,587 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 1,101 \text{ MNm}$$

Konzervativně $k_{yy} = 1,00$

$$k_{zz} = 1,00$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,y} = 0,673 \cdot 0,189 = 0,127 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,z} = 0,673 \cdot 0,049 = 0,033 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0651 = 20,10 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,884 \cdot 0,0651 = 17,76 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0699 = 21,58 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0615 = 18,98 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,673}{20,10} + 1,00 \frac{2,587 + 0,127}{21,58} + 0,60 \frac{1,101 + 0,033}{18,98} = \\ & = 0,033 + 0,126 + 0,036 = 0,195 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,673}{17,76} + 0,60 \frac{2,587 + 0,127}{21,58} + 1,00 \frac{1,101 + 0,033}{18,98} = \\ & = 0,037 + 0,076 + 0,06 = 0,174 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,673}{20,10} + \frac{2,587 + 0,127}{21,58} + \frac{1,101 + 0,033}{18,98} = \\ & = 0,033 + 0,126 + 0,060 = 0,219 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

7.3.9 Posudek průřezu dle předpisu ČSN EN 1993-1-5 4.6

Dle poznámky (3) v [8] je zapotřebí posoudit průřez na boulení ve vzdálenosti menší ze vzdáleností $0,4a$ nebo $0,5b$ od konce panelu s maximálním napětím a to i s ohledem na plné působení průřezu. V případě vyztužených stěn se za parametr b uvažuje maximální výška subpanelu.

$$x = \min\{0,4a; 0,5b\} = \min\{0,4 \cdot 2; 0,5 \cdot 1,18\} = \min\{0,8; 0,59\} = 0,59 \text{ m}$$

$$x_M = 19,238 + 0,59 = 19,828 \text{ m}$$

Maximální vnitřní síly $S2_3$:

$$M_{y,Ed(19,828m),max} = 9,028 \text{ MN}$$

$$M_{z,Ed(19,828m)} = 1,121 \text{ MN}$$

$$N_{Ed(19,828m)} = -0,304 \text{ MN}$$

$$\text{Konzervativně} \quad k_{yy} = 1,00$$

$$k_{zz} = 1,00$$

Do posudku kombinace ohybového momentu a tlakové síly se musí zohlednit účinek tlakové síly vůči novému těžišti pro efektivní průřez.

Kontrola únosnosti efektivního účinného průřezu

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,y} = 0,304 \cdot 0,189 = 0,057 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{N,z} = 0,304 \cdot 0,049 = 0,015 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,304}{20,10} + 1,00 \frac{9,028 + 0,057}{21,580} + 0,60 \frac{1,121 + 0,015}{18,98} = \\ & = 0,015 + 0,421 + 0,036 = 0,472 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,304}{17,76} + 0,60 \frac{9,028 + 0,057}{21,580} + 1,00 \frac{1,121 + 0,015}{18,98} = \end{aligned}$$

$$= 0,017 + 0,253 + 0,060 = 0,330 \leq 1,0$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{0,304}{20,10} + \frac{9,028 + 0,057}{21,580} + \frac{1,121 + 0,015}{18,98} = \\ & = 0,015 + 0,421 + 0,060 = 0,496 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

Kontrola únosnosti plného průřezu

Výpočet součinitele vzpěrnosti pro základní průřez

Předpokládá se, že nosník je na obou stranách k vahadlům připojený pomocí přírubového spoje, který přenáší ohybové momenty a představuje vetknutý konec prutu pro vybočení ve směru osy z i y.

$$L_{cr,y} = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 37\,000 = 18\,500 \text{ mm}$$

Vzpěr ve směru osy z-z (resp. kolmo k ose y)

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{18\,500}{853} = 21,69$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{21,69}{76,40} \cdot 1,0 = 0,284 \quad \dots \text{ křivka vzpěrnosti } d \quad \alpha = 0,76$$

** Dutý průřez tvarovaný za studena.*

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,284 - 0,2) + 0,284^2] = 0,572$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,572 + \sqrt{0,572^2 - 0,284^2}} = 0,936$$

$$\chi_y = 0,936 \leq 1,00 \quad \dots \text{ dochází ke vzpěru prvku}$$

Vzpěr ve směru osy y-y (resp. kolmo k ose z)

$$L_{cr,z} = 37\,000\text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{37\,000}{941} = 39,32$$

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{gr}}} = \frac{39,32}{76,40} \cdot 1,0 = 0,515 \dots \textit{křivka vzpěrnosti d} \quad \alpha = 0,76$$

***Svařovaný průřez.**

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5[1 + 0,76 \cdot (0,515 - 0,2) + 0,515^2] = 0,752$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,752 + \sqrt{0,752^2 - 0,515^2}} = 0,769$$

$$\chi_z = 0,769 \leq 1,00 \dots \textit{dochází ke vzpěru prvku}$$

Pro účinný průřez pro tlakové namáhání dochází ke vzpěru prvku kolmo k ose z a k ose y.

$$N_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,13901 = 42,91\text{ MNm}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,936 \cdot 0,13901 = 40,17\text{ MN}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,769 \cdot 0,13901 = 33,00\text{ MN}$$

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,gr,top} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0958 = 29,57\text{ MNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,gr,bottom} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0899 = 27,75\text{ MNm}$$

A) Kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy y

Rozhodující kombinace S3_4:

$$N_{Ed,přisl} = -0,321 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Edmax} = 9,033 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přisl} = 1,338 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,321}{40,17} + 1,00 \frac{9,033}{29,570} + 0,60 \frac{1,338}{27,750} = \\ & = 0,008 + 0,306 + 0,048 = 0,372 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,321}{33,00} + 0,60 \frac{9,033}{29,570} + 1,00 \frac{1,338}{27,750} = \\ & = 0,01 + 0,184 + 0,080 = 0,274 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,321}{42,91} + \frac{9,033}{29,570} + \frac{1,338}{27,750} = \\ & = 0,008 + 0,306 + 0,080 = 0,394 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

B) Kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy z

Rozhodující kombinace S2_3:

$$N_{Ed,přisl} = 0,068 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přisl} = 5,508 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 2,827 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{0,068}{40,17} + 1,00 \frac{5,508}{29,570} + 0,60 \frac{2,827}{27,750} = \\ & = 0,003 + 0,186 + 0,061 = 0,250 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{0,068}{33,00} + 0,60 \frac{5,508}{29,570} + 1,00 \frac{2,827}{27,750} = \\ & = 0,003 + 0,111 + 0,102 = 0,216 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{0,068}{42,91} + \frac{5,508}{29,570} + \frac{2,827}{27,750} = \\ & = 0,003 + 0,186 + 0,102 = 0,291 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

C) Kombinace s maximální normálovou tlakovou silou

Rozhodující kombinace S2_4:

$$N_{Ed,max} = -0,673 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přísl} = 2,587 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 1,101 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \\ & \frac{0,673}{40,17} + 1,00 \frac{2,587}{29,570} + 0,60 \frac{1,101}{27,750} = \\ & = 0,017 + 0,087 + 0,024 = 0,128 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{0,673}{33,00} + 0,60 \frac{2,587}{29,570} + 1,00 \frac{1,101}{27,750} =$$

$$= 0,020 + 0,052 + 0,040 = 0,112 \leq 1,0$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{0,673}{40,98} + \frac{2,587}{29,570} + \frac{1,101}{27,750} =$$

$$= 0,016 + 0,087 + 0,040 = 0,143 \leq 1,0$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

7.4 Návrh a posudek uzavřeného průřezu v místě náběhu

Průřez v místě náběhu bude posouzen v místě maximální výšky, v případě, že vyhoví, vyhoví jistě i zmenšující se průřez.

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1246 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,0920 \text{ m}^4$$

$$I_{z,gr} = 0,106 \text{ m}^4$$

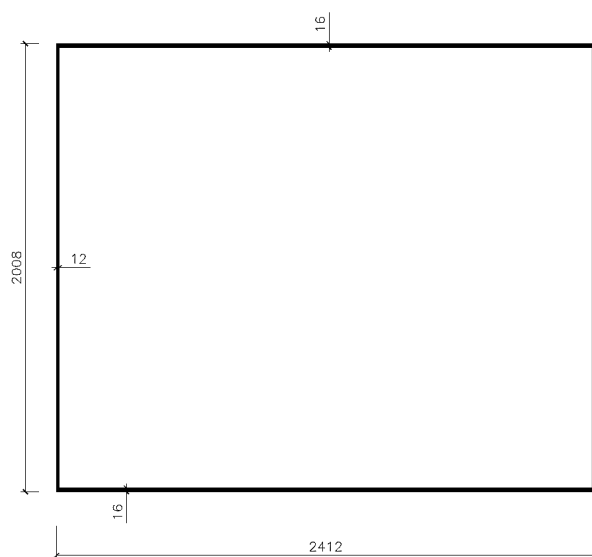
$$h_{top} = 1004 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 2008 - 1004 = 1004 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,0920}{1,004} = 0,0916 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,0920}{1,004} = 0,0916 \text{ m}^3$$

$$W_{z,gr} = \frac{I_{z,gr}}{\frac{b}{2}} = \frac{0,106}{1,206} = 0,088 \text{ m}^3$$



Obr. 188: Průřez v náběhu nosníku

Zatřídění průřezu

Ohýbaná část

Horní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{16} = 150 \geq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Svislá stěna průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{1992}{12} = 166 \geq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Tlačená část

Horní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{16} = 150 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Svislá stěna průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{1992}{12} = 166 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Nesplněno - třída průřezu 4

7.4.1 Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy y)

V místě náběhu je ohybový moment v kladné znaménkové konvenci, jsou tlačena horní vlákna.

Horní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární konstantní průběh napětí $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 3,212$$

$$\bar{\lambda}_p = 3,212 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 + 1 = 4 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{3,212 - 0,055(3 + 1)}{3,212^2} = 0,290$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 2376 \cdot 0,290 = 689,04 \text{ mm}$$

Svislá pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2008 - 16 \cdot 3 = 1960 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = -1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{1960}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{23,9} \cdot 0,814} = 1,445$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,445 \geq 0,637$$

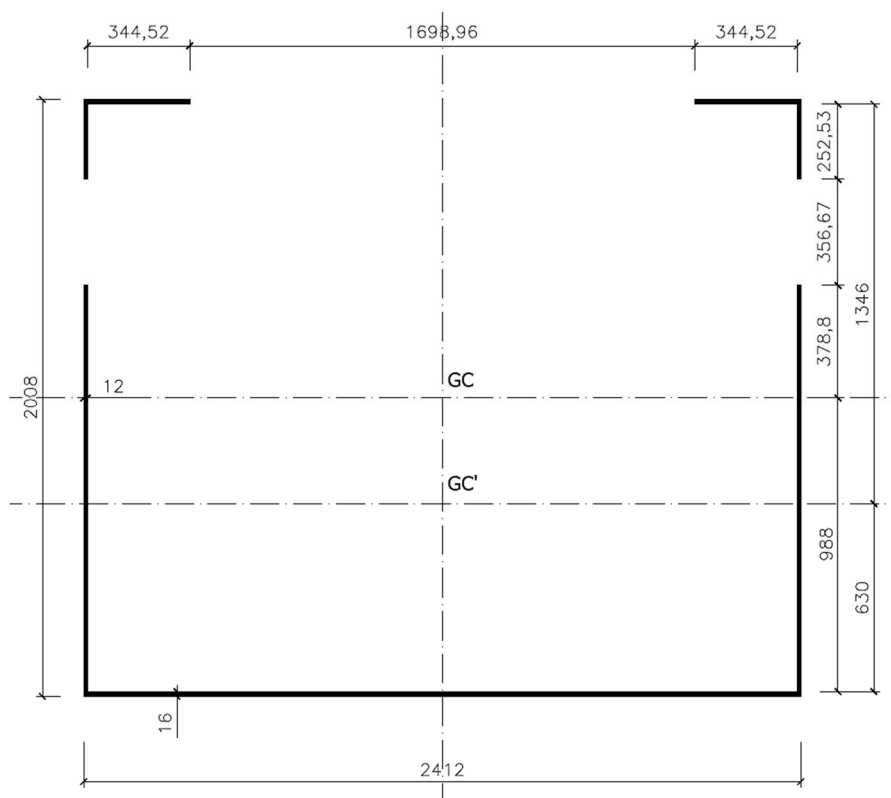
Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,445 - 0,055(3 - 1)}{1,445^2} = 0,639$$

$$b_{eff} = b_c \cdot \rho = 0,639 \cdot 988 = 631,33 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 631,33 = 252,53 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 631,33 = 378,80 \text{ mm}$$



Obr. 189: Redukovaný průřez – pro namáhání kladným ohybovým momentem

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer) – pro namáhání kladným ohybovým momentem:

$$A_{eff} = 0,0889 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0509 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0868 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 1362 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 646 \text{ mm}$$

$$h_{left} = h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0509}{1,362} = 0,0373 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0509}{0,646} = 0,0788 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0868}{1,200} = 0,0723 \text{ m}^3$$

Maximální vnitřní síly S3_3:

$$M_{y,Edmax} = 3,467 \text{ MNm}$$

Ohybová únosnost

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,top} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0373 = 11,51 \text{ MNm}$$

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,bottom} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0788 = 24,33 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{3,467}{11,51} = 0,301 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy y.

7.4.2 Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy z)

Horní a dolní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = -1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{16}}{28,4 \cdot \sqrt{23,9} \cdot 0,814} = 1,314$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,314 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 - 1 = 2 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,314 - 0,055(3 - 1)}{1,314^2} = 0,697$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 1188 \cdot 0,697 = 828,036 \text{ mm}$$

Účinné šířky

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 828,036 = 331,21 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 828,036 = 496,82 \text{ mm}$$

Svislá pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2008 - 16 \cdot 3 = 1960 \text{ mm}$$

Pro lineární konstantní průběh napětí - konzervativně $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{1960}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 3,533$$

$$\bar{\lambda}_p = 3,533 \geq 0,637$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{3,533 - 0,055(3 + 1)}{3,533^2} = 0,265$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 1960 \cdot 0,265 = 519,4 \text{ mm}$$


$$A_{eff} = 0,0954 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0773 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0620 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 1004 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 1004 \text{ mm}$$

$$h_{left} = 906 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1506 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0773}{1,004} = 0,0770 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{0,0773}{1,004} = 0,0770 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0662}{0,906} = 0,073 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{right}} = \frac{0,0662}{1,506} = 0,044 \text{ m}^3$$

Maximální vnitřní síly S1_2:

$$M_{z,Ed,přísl} = 0,543 \text{ MNm}$$

Ohybová únosnost

$$M_{z,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,right} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0730 = 22,53 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,left} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0440 = 13,58 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{0,543}{13,58} = 0,040 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy z.

7.4.3 Posudek na únosnost v tahu

Kombinace S1_3:

$$N_{Edmax} = 0,505 \text{ MN}$$

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1246 \text{ m}^2$$

Únosnost v tahu

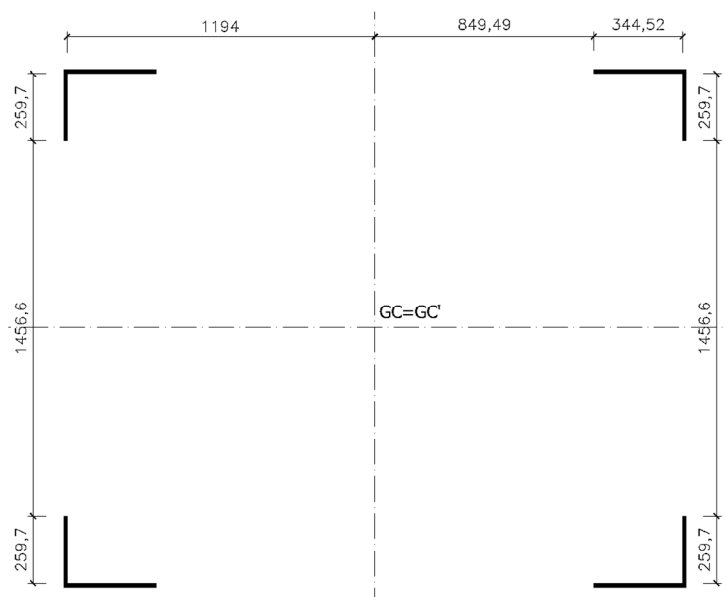
$$N_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,1246 = 38,46 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,505}{38,46} = 0,013 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tahem.

7.4.4 Posouzení únosnosti průřezu v tlaku

V kapitole posouzení ohybové únosnosti ve směru osy z a y byly stanoveny efektivní účinné šířky plně tlačných stěn průřezu, tyto šířky jsou zavedeny do následujícího výpočtu průřezových charakteristik redukovaného průřezu.



Obr. 191: Redukovaný průřez

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{eff} = 0,0353 \text{ m}^2$$

Vzpěrná únosnost průřezu

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0353 = 10,89 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,509}{10,89} = 0,047 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tlakem.

A) Posudek kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy y

Maximální vnitřní síly S3_3:

$$N_{Ed,přísl} = 0,504 \text{ MN.}$$

$$M_{y,Edmax} = 3,467 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 0,066 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,505 \cdot 0,358 = 0,181 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,505 \cdot 0,303 = 0,153 \text{ MNm}$$

Únosnost v tahu:

$$\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0353 = 10,89 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0373 = 11,51 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0440 = 13,58 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{0,505}{10,89} + \frac{3,467 + 0,181}{11,51} + \frac{0,066 + 0,153}{13,58} = \\ & = 0,046 + 0,317 + 0,016 = 0,379 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tahové síly.

B) Posudek kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy z

Maximální vnitřní síly S1_2:

$$N_{Ed,přísl} = -0,014 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přísl} = 1,330 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 0,543 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,014 \cdot 0,358 = 0,001 \text{ MNm} \dots \text{ lze zanedbat}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,014 \cdot 0,303 = 0,001 \text{ MNm} \dots \text{ lze zanedbat}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0353 = 10,89 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0373 = 11,51 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0440 = 13,58 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,014}{10,89} + \frac{1,330}{11,51} + \frac{0,543}{13,58} = \\ & = 0,001 + 0,116 + 0,040 = 0,157 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

C) Posudek kombinace s maximální normálovou silou

Maximální vnitřní síly S1_4:

$$N_{Ed,max} = -0,506 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přisl} = 0,654 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přisl} = 0,096 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,506 \cdot 0,358 = 0,181 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,506 \cdot 0,303 = 0,153 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0353 = 10,89 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0373 = 11,51 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

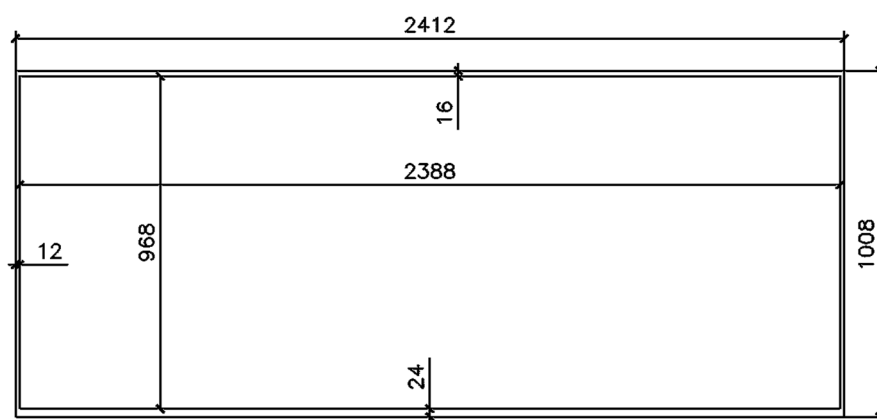
$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0440 = 13,58 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \\ & \frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} + \frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{0,506}{10,89} + \frac{0,654 + 0,171}{11,51} + \frac{0,096 + 0,153}{13,58} = \\ & = 0,046 + 0,072 + 0,018 = 0,136 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

7.5 Návrh a posudek krajního uzavřeného průřezu

Na okraji nosníku je vytvořený náběh a výška průřezu se zmenšuje z výšky 2008 mm na výšku 1008 mm. Vzhledem k průběhům ohybového momentu M_y , který je charakteristický pro vetknutý nosník, kdy v místě pravého vahadla je nosník namáhán záporným ohybovým momentem, jsou stanoveny průřezové charakteristiky pro obě varianty (tlačená horní pásnice a tlačená dolní pásnice) a do posudku jsou uvažovány průřezové charakteristiky menší. Obě varianty jsou zahrnuty z důvodu, že průřez je v krajní části namáhán oběma způsoby pro různé kombinace zatížení.



Obr. 192: Průřez na okraji nosníku

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1197 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,0246 \text{ m}^4$$

$$I_{z,gr} = 0,0822 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 581 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 1008 - 581 = 427 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,0246}{0,581} = 0,0423 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,0246}{0,427} = 0,0576 \text{ m}^3$$

$$W_{z,gr} = \frac{I_{z,gr}}{\frac{b}{2}} = \frac{0,0822}{1,206} = 0,0682 \text{ m}^3$$

Zatřídění průřezu

Ohýbaná část

Horní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{16} = 150 \geq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Dolní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{24} = 100 \leq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Splněno - třída průřezu 3

Svislá stěna průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{968}{12} = 80,67 \leq 124\varepsilon = 124 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 100,89$$

Splněno - třída průřezu 3

Tlačená část

Horní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{16} = 150 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Dolní pásnice průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{2400}{24} = 100 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Nesplněno - třída průřezu 4

Svislá stěna průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{968}{12} = 80,67 \geq 42\varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 34,17$$

Nesplněno - třída průřezu 4

7.5.1 Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy y)

Namáhání kladným ohybovým momentem:

Horní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární konstantní průběh napětí $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{16}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 3,212$$

$$\bar{\lambda}_p = 3,212 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 + 1 = 4 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{3,212 - 0,055(3 + 1)}{3,212^2} = 0,290$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 2376 \cdot 0,290 = 689,04 \text{ mm}$$

Svislá pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 1008 - 16 \cdot 3 = 960 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = -1,0$

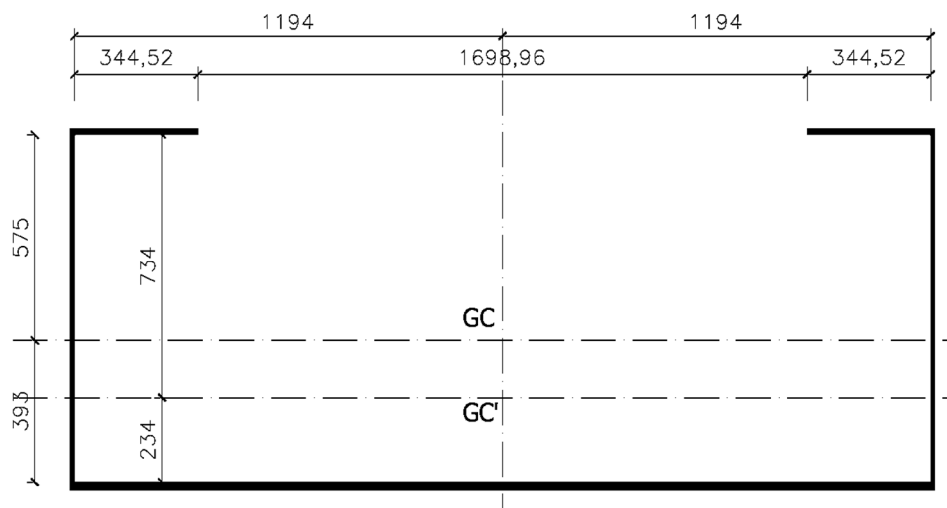
$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{960}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{23,9} \cdot 0,814} = 0,708$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,708 \geq 0,637$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,708 - 0,055(3 - 1)}{0,708^2} = 1,193$$

$$b_{eff} = b = 960 \text{ mm}$$



Obr. 193: Redukovaný průřez – pro namáhání kladným ohybovým momentem

Namáhání záporným ohybovým momentem:

Dolní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární konstantní průběh napětí $\psi = 1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{24}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 2,141$$

$$\bar{\lambda}_p = 2,141 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 + 1 = 4 \geq 0$$

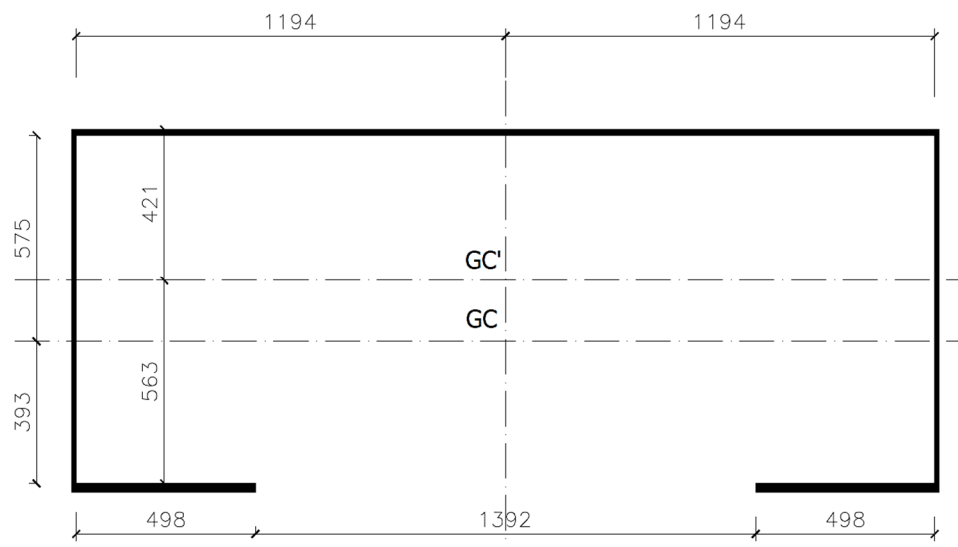
Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{2,141 - 0,055(3 + 1)}{2,141^2} = 0,419$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 2376 \cdot 0,419 = 995,54 \text{ mm}$$

Svislá pásnice

Charakteristiky stěny průřezu se nemění, k vyboulení stěny nedochází.



Obr. 194: Redukovaný průřez – pro namáhání záporným ohybovým momentem

Průřezové charakteristiky plného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1197 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,0241 \text{ m}^4$$

$$I_{z,gr} = 0,0802 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 583 \text{ mm}$$

$$b_{bottom} = 405 \text{ mm}$$

$$h_{left} = 1200 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,0241}{0,583} = 0,041 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{b_{bottom}} = \frac{0,0241}{0,405} = 0,0595 \text{ m}^3$$

$$W_{z,gr,left} = W_{z,gr,right} = \frac{I_{z,gr}}{h_{left}} = \frac{0,0802}{1,200} = 0,0668 \text{ m}^3$$

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer) – pro namáhání kladným ohybovým momentem:

$$A_{eff} = 0,0925 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0130 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0737 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 742 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 246 \text{ mm}$$

$$h_{left} = h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0130}{0,742} = 0,0175 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0130}{0,246} = 0,0528 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0737}{1,200} = 0,0614 \text{ m}^3$$

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer) – pro namáhání záporným ohybovým momentem:

$$A_{eff} = 0,0863 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0166 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0748 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 421 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 563 \text{ mm}$$

$$h_{left} = h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0166}{0,421} = 0,0394 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0166}{0,563} = 0,0294 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0748}{1,200} = 0,0623 \text{ m}^3$$

Maximální vnitřní síly S1_4:

$$M_{y,Edmax} = -1,692 \text{ MNm} \quad \dots \text{ na okraji nosníku}$$

Maximální vnitřní síly S3_3:

$$M_{y,Edmax} = +1,890 \text{ MNm} \quad \dots \text{ na okraji nosníku}$$

Maximální vnitřní síly S3_1:

$$M_{z,Ed,přísl} = 0,503 \text{ MNm}$$

Jelikož vzniká maximální ohybový moment v kombinaci S3_3, který vyvozuje tlak v horních vláknech průřezu, jsou posudky uvažovány pro tento ohybový moment a příslušné účinné průřezové charakteristiky.

Ohybová únosnost

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,right} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0175 = 5,40 \text{ MNm}$$

$$M_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{y,eff,left} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0614 = 18,95 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{1,89}{5,40} = 0,350 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy y.

7.5.2 Posudek prosté ohybové únosnosti (kolem osy z)

Horní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = -1,0$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{16}}{28,4 \cdot \sqrt{23,9} \cdot 0,814} = 1,314$$

$$\overline{\lambda}_p = 1,314 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 - 1 = 2 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{1,314 - 0,055(3 - 1)}{1,314^2} = 0,697$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 1188 \cdot 0,697 = 828,036 \text{ mm}$$

Účinné šířky

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 828,036 = 331,21 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 828,036 = 496,82 \text{ mm}$$

Svislá pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 1008 - 16 \cdot 3 = 960 \text{ mm}$$

Pro lineární konstantní průběh napětí - konzervativně $\psi = 1,0$

$$\overline{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{960}{12}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 1,730$$

$$\overline{\lambda}_p = 1,730 \geq 0,637$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{1,730 - 0,055(3 + 1)}{1,730^2} = 0,505$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 960 \cdot 0,505 = 494,4 \text{ mm}$$

Spodní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = -1,0$

$$\overline{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{24}}{28,4 \cdot \sqrt{23,9} \cdot 0,814} = 0,876$$

$$\overline{\lambda}_p = 0,876 \geq 0,637; 3 - \psi = 3 - 1 = 2 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

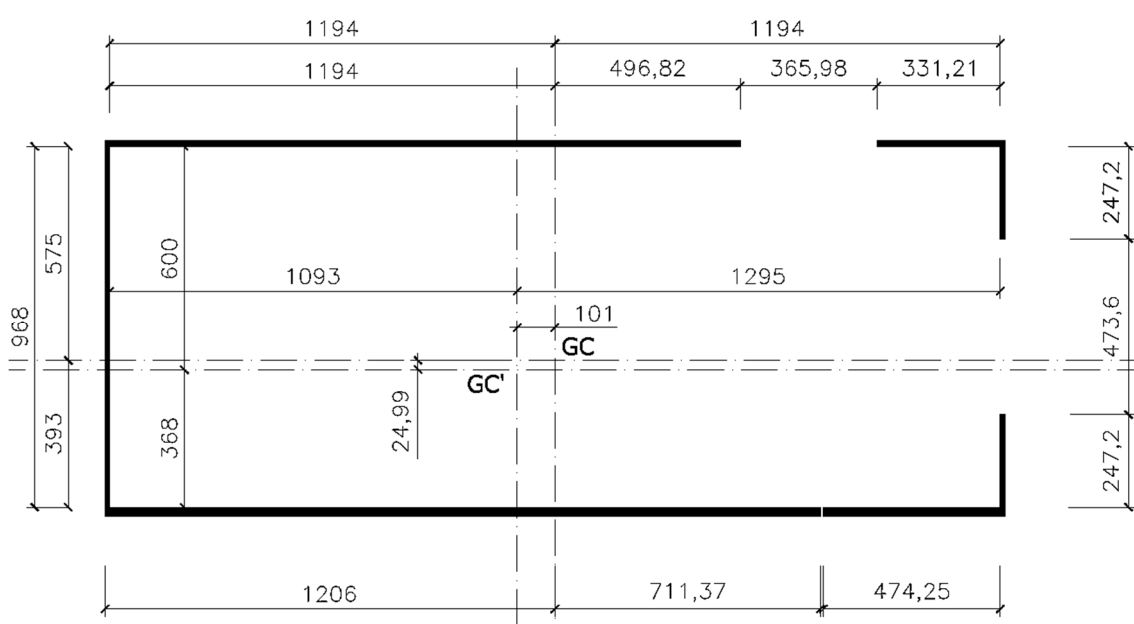
$$\rho = \frac{\overline{\lambda_p} - 0,055(3 + \psi)}{\overline{\lambda_p}^2} = \frac{0,876 - 0,055(3 - 1)}{0,876^2} = 0,998$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 1188 \cdot 0,998 = 1185,62 \text{ mm}$$

Účinné šířky

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 1185,62 = 474,25 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 1185,62 = 711,37 \text{ mm}$$



Obr. 195: Redukovaný průřez

Průřezové charakteristiky plného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1197 \text{ m}^2$$

$$I_{y,gr} = 0,0241 \text{ m}^4$$

$$I_{z,gr} = 0,0802 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 583 \text{ mm}$$

$$b_{bottom} = 405 \text{ mm}$$

$$h_{left} = 1200 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,gr,top} = \frac{I_{y,gr}}{h_{top}} = \frac{0,0241}{0,583} = 0,041 \text{ m}^3$$

$$W_{y,gr,bottom} = \frac{I_{y,gr}}{h_{bottom}} = \frac{0,0241}{0,405} = 0,0595 \text{ m}^3$$

$$W_{z,gr,left} = W_{z,gr,right} = \frac{I_{z,gr}}{h_{left}} = \frac{0,0802}{1,200} = 0,0668 \text{ m}^3$$

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{eff} = 0,1080 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0238 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0683 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 608 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 380 \text{ mm}$$

$$h_{left} = 1099 \text{ mm}$$

$$h_{right} = 1301 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0238}{0,608} = 0,0391 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0238}{0,380} = 0,0626 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0683}{1,099} = 0,062 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{right}} = \frac{0,0683}{1,301} = 0,052 \text{ m}^3$$

Maximální vnitřní síly S3_3:

$$M_{y,Edmax} = 1,89 \text{ MNm} \quad \dots \text{ na okraji nosníku}$$

Maximální vnitřní síly CO_11:

$$M_{z,Ed,přisl} = 0,503 \text{ MNm}$$

Ohybová únosnost

$$M_{z,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,right} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0520 = 16,05 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot W_{z,eff,left} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0620 = 19,14 \text{ MNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{0,503}{16,050} = 0,313 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na prostý ohyb kolem osy z.

7.5.3 Posudek na únosnost v tahu

Kombinace S1_3:

$$N_{Edmax} = 0,508 \text{ MN}$$

Základní průřezové charakteristiky (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{gr} = 0,1197 \text{ m}^2$$

Únosnost v tahu

$$N_{Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \cdot A_{gr} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,1197 = 36,95 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,508}{36,95} = 0,014 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tahem.

7.5.4 Posouzení únosnosti průřezu v tlaku

V kapitole posouzení ohybové únosnosti ve směru osy z a y byly stanoveny efektivní účinné šířky plně tlačných stěn průřezu, tyto šířky jsou zavedeny do následujícího výpočtu průřezových charakteristik redukovaného průřezu.

Spodní vodorovná pásnice

$$\bar{b} = b - 3t = 2412 - 12 \cdot 3 = 2376 \text{ mm}$$

Pro lineární průběh napětí - konzervativně $\psi = 1,0$

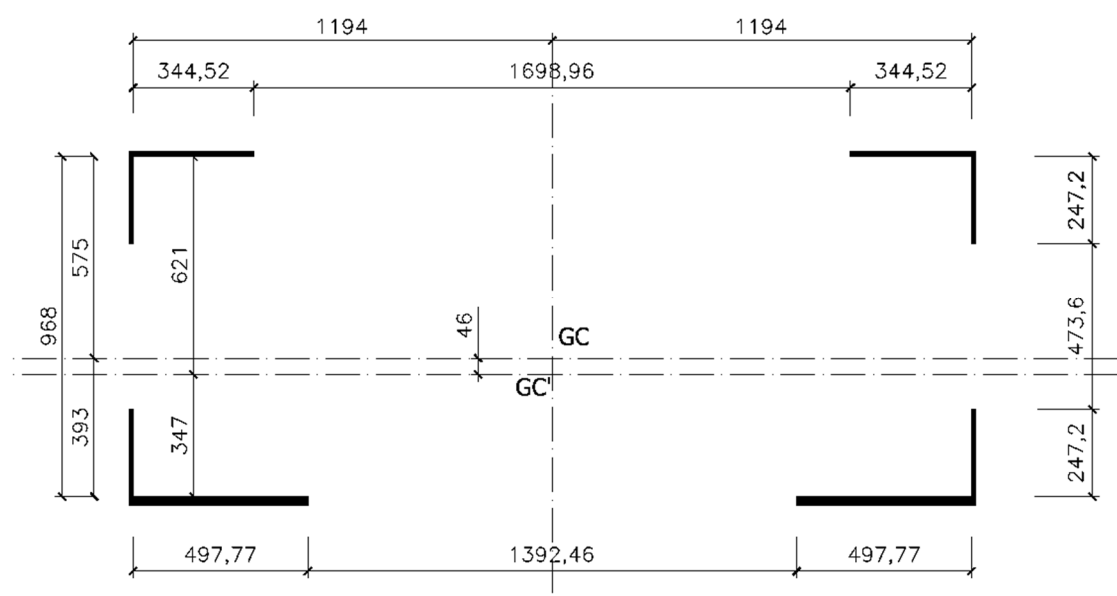
$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma} \cdot \varepsilon} = \frac{\frac{2376}{24}}{28,4 \cdot \sqrt{4} \cdot 0,814} = 2,141$$

$$\bar{\lambda}_p = 2,141 \geq 0,637; 3 + \psi = 3 + 1 = 4 \geq 0$$

Součinitel boulení se stanoví dle vztahu:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{2,141 - 0,055(3 + 1)}{2,141^2} = 0,419$$

$$b_{eff} = b \cdot \rho = 2412 \cdot 0,419 = 995,54 \text{ mm}$$



Obr. 196: Redukovaný průřez

Průřezové charakteristiky redukovaného průřezu (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{eff} = 0,0477 \text{ m}^2$$

$$I_{y,eff} = 0,0095 \text{ m}^4$$

$$I_{z,eff} = 0,0519 \text{ m}^4$$

$$h_{top} = 629 \text{ mm}$$

$$h_{bottom} = 359 \text{ mm}$$

$$h_{left} = h_{right} = 1200 \text{ mm}$$

$$W_{y,eff,top} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top}} = \frac{0,0095}{0,629} = 0,0151 \text{ m}^3$$

$$W_{y,eff,bottom} = \frac{I_{y,eff}}{h_{bottom}} = \frac{0,0095}{0,359} = 0,026 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,left} = W_{z,eff,right} = \frac{I_{z,eff}}{h_{left}} = \frac{0,0519}{1,200} = 0,043 \text{ m}^3$$

Vzpěrná únosnost průřezu

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

$$\eta_2 = \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{0,503}{14,72} = 0,034 \leq 1,00$$

Průřez vyhovuje na namáhání tlakem.

D) Posudek kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy y

Maximální vnitřní síly S3_3:

$$N_{Ed,přísl} = -0,520 \text{ MN}$$

$$M_{y,Edmax} = 1,890 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 0,260 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,520 \cdot 0,159 = 0,083 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,520 \cdot 0,101 = 0,053 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0175 = 5,40 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0520 = 16,05 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{0,520}{14,72} + \frac{1,890 + 0,083}{5,40} + \frac{0,260 + 0,053}{16,05} = \\ & = 0,035 + 0,365 + 0,020 = 0,420 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

E) Posudek kombinace s maximálním ohybovým momentem kolem osy z

Maximální vnitřní síly S3_1:

$$N_{Ed,přísl} = -0,124 \text{ MN}$$

$$M_{y,Ed,přísl} = 0,626 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,max} = 0,503 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,124 \cdot 0,159 = 0,020 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,124 \cdot 0,101 = 0,013 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0175 = 5,40 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0520 = 16,05 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\ & = \frac{0,124}{14,72} + \frac{0,626 + 0,020}{5,40} + \frac{0,503 + 0,013}{16,05} = \\ & = 0,009 + 0,120 + 0,032 = 0,161 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

F) Posudek kombinace s maximální normálovou silou

Maximální vnitřní síly S1_4:

$$N_{Ed,max} = -0,522 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přisl} = 1,692 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přisl} = 0,253 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z = 0,522 \cdot 0,159 = 0,083 \text{ MNm}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y = 0,522 \cdot 0,101 = 0,053 \text{ MNm}$$

Únosnost v tlaku:

$$\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

$$\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot A_{eff} = \frac{355}{1,15} \cdot 0,0477 = 14,72 \text{ MN}$$

Únosnost v ohybu kolem osy y:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{y,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0175 = 5,40 \text{ MNm}$$

Únosnost v ohybu kolem osy z:

$$\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \cdot W_{z,eff} = \frac{1,00 \cdot 355}{1,15} \cdot 0,0520 = 16,05 \text{ MNm}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \\ & \frac{N_{Rd}}{\gamma_{M1}} + \frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}} = \\ & = \frac{0,522}{14,72} + \frac{1,692 + 0,083}{5,40} + \frac{0,253 + 0,053}{16,05} = \\ & = 0,035 + 0,329 + 0,019 = 0,383 \leq 1,0 \end{aligned}$$

Nosník vyhovuje na kombinaci ohybového momentu a tlakové síly.

7.6 Smyková odolnost vnitřního komorového průřezu

Posudek posouvající síly je proveden na počátku umístěného hlavního komorového vyztuženého panelu a v krajní části kde působí maximální posouvající síla.

Maximální vnitřní síly S1_3:

$$V_{z,Ed} = 0,852 \text{ MN}$$

Maximální vnitřní síly S3_1:

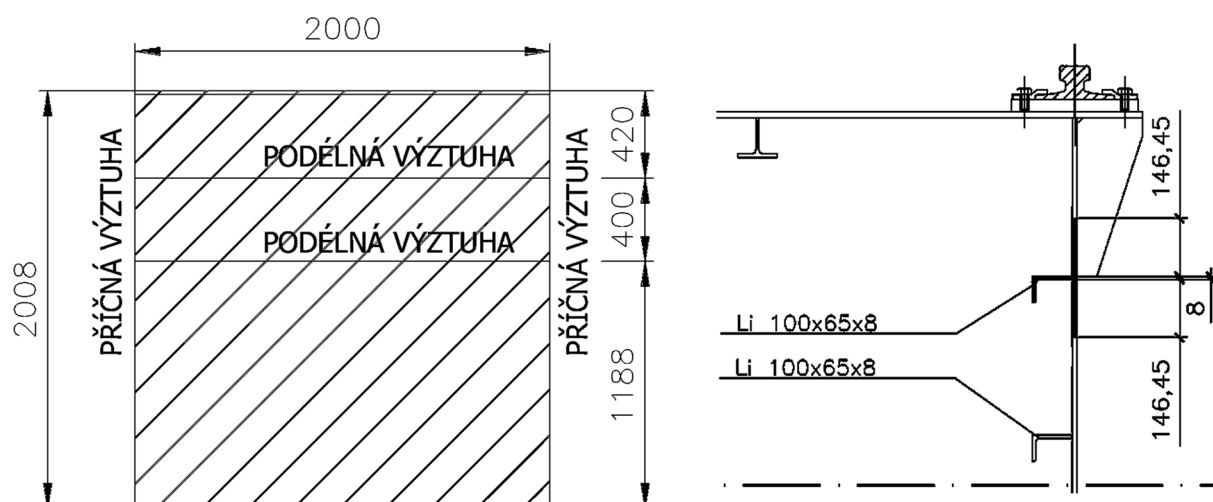
$$V_{y,Ed} = 0,267 \text{ MN}$$

7.6.1 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z

Příspěvek stojiny nosníku

S výtuhou stěny průřezu spolupůsobí její část ve velikosti stanovené podle vztahu:

$$l = 15\epsilon t_w = 15 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot 12 = 146,45 \text{ mm}$$



Obr. 197: Schéma vyztuženého panelu a spolupůsobící části stěny s výztuhou

Průřezové charakteristiky výztuhy se spolupůsobící částí stojiny (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{sl} = 4,887 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_{z,sl} = 6,323 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3 [8]:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{2000}{2008} = 0,996$$

$$\alpha = 0,996 \leq 3,00$$

Stranový poměr splňuje podmínku, kritické napětí ve smyku pro stěnu se dvěma podélnými výztuhami stanoví podle vztahu:

$$\begin{aligned} \kappa_\tau &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{\sum I_{sl}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{\sum I_{sl}}{t^3 h_w}} = \\ &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2 \cdot 6,323 \cdot 10^{-6}}{0,012^3 \cdot 2,008}}{0,996^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 6,323 \cdot 10^{-6}}{0,012^3 \cdot 2,008}} = 11,11 + 3,39 = 14,50 \end{aligned}$$

Upravená štíhlost panelu s výztuhami ve smyku:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_\tau}} = \frac{2008}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{14,50}} = 1,444$$

Upravená štíhlost panelu pro jednotlivé subpanely:

Subpanel I

$$h_{w1} = 420 \text{ mm}$$

$$\kappa_{\tau,st} = 0,00 \dots \text{subpanel bez výztuhy}$$

$$\alpha = \frac{a}{h_{w1}} = \frac{2000}{420} = 4,76 \geq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1l} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_{w1}}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{420}{2000} \right)^2 + 0 = 5,516$$

Upravená štíhlost subpanelu ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w1} = \frac{h_{w1}}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 1l}}} = \frac{420}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{5,516}} = 0,490$$

Subpanel II

$$h_{w2} = 400 \text{ mm}$$

$$\kappa_{\tau,st} = 0,00 \dots \text{subpanel bez výztuhy}$$

$$\alpha = \frac{a}{h_{w2}} = \frac{2000}{400} = 5,00 \geq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 2l} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_{w2}}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{400}{2000} \right)^2 + 0 = 5,500$$

Upravená štíhlost subpanelu ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w2} = \frac{h_{w2}}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 2l}}} = \frac{400}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{5,500}} = 0,467$$

Subpanel III

$$h_{w3} = 1188 \text{ mm}$$

$$\kappa_{\tau,st} = 0,00 \dots \text{subpanel bez výztuhy}$$

$$\alpha = \frac{a}{h_{w3}} = \frac{2000}{1188} = 1,684 \geq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 3l} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_{w3}}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{1188}{2000} \right)^2 + 0 = 6,751$$

Upravená štíhlost subpanelu ve smyku:

$$\overline{\lambda_{w3}} = \frac{h_{w3}}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 3l}}} = \frac{1188}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{6,751}} = 1,252$$

Výsledná štíhlost ve smyku:

$$\overline{\lambda_{w,fin}} = \max\{\overline{\lambda_w}; \overline{\lambda_{w1}}; \overline{\lambda_{w2}}; \overline{\lambda_{w3}}\} = \max\{1,444; 0,490; 0,467; 1,252\} = 1,444$$

Kritické je boulení ve smyku celého panelu s výztuhami.

$$\overline{\lambda_{w,fin}} = 1,444 \geq 1,08$$

Součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda_{w,fin}}} = \frac{1,37}{0,7 + 1,444} = 0,639$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,639 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,008 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 2744,20 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$V_{b,Rd} = 2744,20 \text{ kN} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,008 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 5153,4 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{852,00}{2 \cdot 2744,20} = 0,155 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.6.2 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{852,00}{2 \cdot 2744,20} = 0,155 \leq 0,50$$

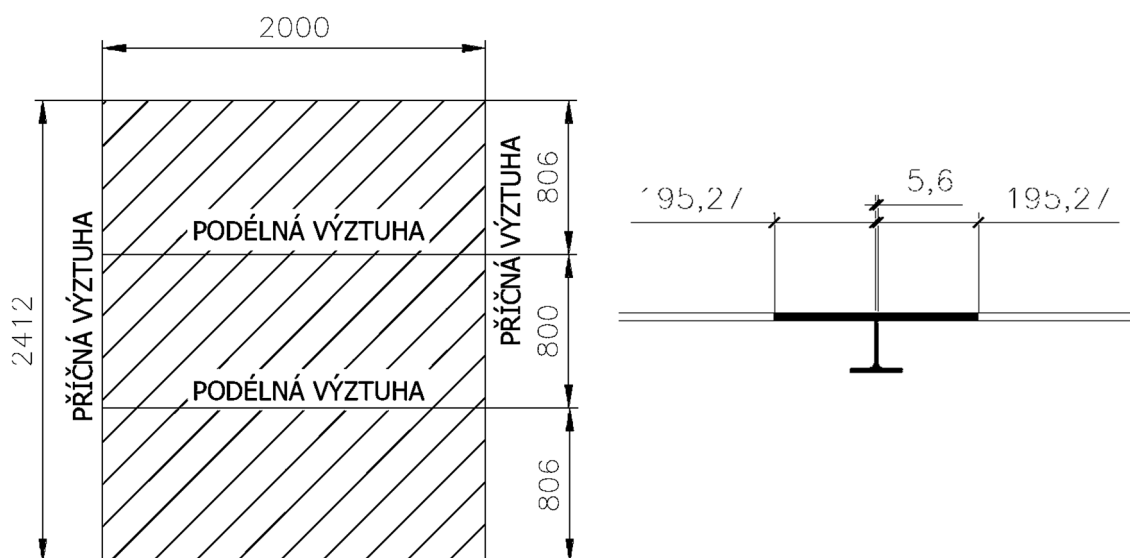
Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu.

7.6.3 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y

Příspěvek horní pásnice nosníku

S výztuhou pásnice průřezu spolupůsobí její část ve velikosti stanovené podle vztahu:

$$l = 15 \varepsilon t_w = 15 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \cdot 16 = 195,27 \text{ mm}$$



Obr. 198: Schéma vyztuženého panelu a spolupůsobící části pásnice s výztuhou

Průřezové charakteristiky výztuhy se spolupůsobící částí stojiny (stanoveny pomocí software Scia Engineer):

$$A_{sl} = 7,785 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_{y,sl} = 9,941 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3:

$$\alpha = \frac{a}{b_w} = \frac{2000}{2412} = 0,830$$

$$\alpha = 0,830 \leq 3,00$$

Stranový poměr splňuje podmínku, kritické napětí ve smyku pro pásnici se dvěma podélnými výztuhami stanoví podle vztahu:

$$\begin{aligned} \kappa_\tau &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{\sum I_{sl}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{\sum I_{sl}}{t^3 h_w}} = \\ &= 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{2 \cdot 9,941 \cdot 10^{-6}}{0,016^3 \cdot 2,412}}{0,830^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 9,941 \cdot 10^{-6}}{0,016^3 \cdot 2,412}} = 13,77 + 2,78 = 16,55 \end{aligned}$$

Upravená štíhlost panelu s výztuhami ve smyku:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{b_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_\tau}} = \frac{2412}{37,4 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{16,55}} = 1,218$$

Upravená štíhlost panelu pro jednotlivé subpanely (stanoveno pro subpanel jeden, jelikož všechny ostatní jsou totožné):

Subpanel I

$$b_{w1} = 800 \text{ mm}$$

$$\kappa_{\tau,st} = 0,00 \dots \text{subpanel bez výztuhy}$$

$$\alpha = \frac{a}{b_{w1}} = \frac{2000}{800} = 2,50 \geq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1l} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{b_{w1}}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{800}{2000} \right)^2 + 0 = 5,980$$

Upravená štíhlost subpanelu ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w1} = \frac{b_{w1}}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 1l}}} = \frac{800}{37,4 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{5,980}} = 0,672$$

Výsledná štíhlost ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = \max\{\overline{\lambda}_w; \overline{\lambda}_{w1}\} = \max\{1,218; 0,672\} = 1,218$$

Kritické je boulení ve smyku celého panelu s výztuhami.

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = 1,218 \geq 1,08$$

Součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_{w,fin}} = \frac{1,37}{0,7 + 1,218} = 0,714$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,714 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 4910,95 \text{ kN}$$

Příspěvek spodní pásnice nosníku

$$b_{w1} = 2412 \text{ mm}$$

$$\kappa_{\tau,st} = 0,00 \dots \text{ subpanel bez výztuhy}$$

$$\alpha = \frac{a}{b_{w1}} = \frac{2000}{2412} = 0,860 \leq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1l} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{b_{w1}}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{2412}{2000} \right)^2 + 0 = 11,77$$

Upravená štíhlost subpanelu ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w1} = \frac{b_{w1}}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 11}}} = \frac{2412}{37,4 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{11,77}} = 1,444$$

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = 1,444 \geq 1,08$$

Součinitel příspěvku pásnice k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \overline{\lambda}_{w,fin}} = \frac{1,37}{0,7 + 1,444} = 0,639$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot b_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,639 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 4395,10 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$\begin{aligned} V_{b,Rd} &= V_{bw,Rd,1} + V_{bw,Rd,2} = 4395,10 + 4910,95 \text{ kN} = 9306,05 \text{ kN} \\ &\leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot b_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 16507,39 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{267,00}{9306,05} = 0,029 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.6.4 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{267,00}{2 \cdot 2744,20} = 0,029 \leq 0,50$$

Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu. V případě, že by poměr η_3 přesáhl hodnotu 0.5, musela by se provést redukce návrhové únosnosti osově síly a ohybového momentu s ohledem na působení smykové síly.

7.7 Smyková odolnost uzavřeného průřezu náběhu

Maximální vnitřní síly S1_3:

$$V_{y,Ed} = 0,266 \text{ MN}$$

Maximální vnitřní síly S1_3:

$$V_{z,Ed} = 0,969 \text{ MN}$$

7.7.1 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z

Stojina uzavřeného průřezu není vyztužena podélnými výztuhami. Vzdálenost příčných výztuh je 2360 mm v posuzovaném místě.

Příspěvek stojiny nosníku

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3 pro průměrnou výšku náběhu:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{2360}{1508} = 1,565$$

$$\alpha = 1,565 \geq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1} = 5,34 + 4,00 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{1508}{2360} \right)^2 + 0 = 6,18$$

Upravená štíhlost stěny ve smyku:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 1}}} = \frac{1508}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{6,18}} = 1,66$$

Výsledná štíhlost ve smyku:

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = 1,66 \leq 1,08$$

Součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{1,37}{(0,7 + \lambda_{w,fin})} = \frac{1,37}{0,7 + 1,66} = 0,581$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,581 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 1,508 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 1873,82 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$V_{b,Rd} = 1873,82 \text{ kN} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 1,508 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 3870,20 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{969,00}{2 \cdot 1873,82} = 0,259 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.7.2 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{969,00}{2 \cdot 1873,82} = 0,259 \leq 0,50$$

Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu.

7.7.3 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y

Příspěvek pásnice nosníku

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3:

$$\alpha = \frac{a}{b_w} = \frac{2360}{2412} = 0,978$$

$$\alpha = 0,978 \leq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{2412}{2360} \right)^2 + 0 = 9,58$$

Upravená štíhlost panelu s výztuhami ve smyku:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{b_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_\tau}} = \frac{2412}{37,4 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{9,58}} = 1,600$$

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = 1,60 \geq 1,08$$

Součinitel příspěvku pásnice k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{1,37}{(0,7 + \overline{\lambda}_{w,fin})} = \frac{1,37}{0,7 + 1,60} = 0,595$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot b_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,595 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 4092,46 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$V_{b,Rd} = 4092,46 \text{ kN} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 8253,69 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{266}{2 \cdot 4092,46} = 0,032 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.7.4 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{266}{2 \cdot 4092,46} = 0,032 \leq 0,50$$

Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu. V případě, že by poměr η_3 přesáhl hodnotu 0,5, musela by se provést redukce návrhové únosnosti osově síly a ohybového momentu s ohledem na působení smykové síly.

7.8 Smyková odolnost krajního uzavřeného průřezu

Posudek posouvající síly je proveden na počátku umístěného hlavního komorového vyztuženého panelu a v krajní části kde působí maximální posouvající síla.

Maximální vnitřní síly S1_3:

$$V_{y,Ed} = 0,274 \text{ MN}$$

Maximální vnitřní síly S1_3:

$$V_{z,Ed} = 0,969 \text{ MN}$$

7.8.1 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy z

Stojina uzavřeného průřezu není vyztužena podélnými výztuhami. Vzdálenost příčných výztuh je 684 mm v posuzovaném místě.

Příspěvek stojiny nosníku

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3 [8]:

$$\alpha = \frac{a}{h_w} = \frac{684}{1008} = 0,679$$

$$\alpha = 0,679 \leq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{1008}{684} \right)^2 + 0 = 15,597$$

Upravená štíhlost stěny ve smyku:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau 1}}} = \frac{1008}{37,4 \cdot 12 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{15,597}} = 0,699$$

Výsledná štíhlost ve smyku:

$$\overline{\lambda_{w,fin}} = 0,699$$

$$0,83/\eta = 0,83/1,2 = 0,692 \leq \overline{\lambda_{w,fin}} = 0,699 \leq 1,08$$

Součinitel příspěvku stojiny k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \frac{0,83}{\overline{\lambda_{w,fin}}} = \frac{0,83}{0,699} = 1,187$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,187 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 1,008 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 2588,95 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$V_{b,Rd} = 2588,95 \text{ kN} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 1,008 \cdot 0,012}{\sqrt{3} \cdot 1,15} \\ = 2586,97 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{969,00}{2 \cdot 2588,95} = 0,188 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.8.2 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{z,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{969,00}{2 \cdot 2588,95} = 0,188 \leq 0,50$$

Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu.

7.8.3 Posudek smykové únosnosti pro přenos síly ve směru osy y

Příspěvek pásnice nosníku

Ověření stranového poměru dle požadavku normy ČSN NE 1993-1-5 článku (2) přílohy A3 [8]:

$$\alpha = \frac{a}{b_w} = \frac{684}{2412} = 0,284$$

$$\alpha = 0,284 \leq 1,00$$

Součinitel kritického napětí se stanoví podle vztahu:

$$\kappa_{\tau 1} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 + \kappa_{\tau,sl} = 4,00 + 5,34 \left(\frac{2412}{684} \right)^2 + 0 = 70,402$$

Upravená štíhlost panelu s výztuhami ve smyku:

$$\overline{\lambda}_w = \frac{b_w}{37,4 \cdot t \cdot \varepsilon \sqrt{\kappa_{\tau}}} = \frac{2412}{37,4 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} \sqrt{70,402}} = 0,590$$

$$\overline{\lambda}_{w,fin} = 0,590 \leq 0,83/\eta = 0,83/1,2 = 0,692$$

Součinitel příspěvku pásnice k únosnosti v boulení při smyku za předpokladu tuhé koncové výztuhy se stanoví dle vztahu:

$$\chi_w = \eta = 1,20$$

Příspěvek k smykové únosnosti od stojiny:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot b_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,20 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} = 8253,69 \text{ kN}$$

Posouzení smykové únosnosti

$$\begin{aligned} V_{b,Rd} = 8253,69 \text{ kN} &\leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \cdot 355 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 2,412 \cdot 0,016}{\sqrt{3} \cdot 1,15} \\ &= 8253,69 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{274}{2 \cdot 8253,69} = 0,017 \leq 1,00$$

Smyková únosnost pro přenos smykové síly V_z vyhovuje.

7.8.4 Interakce ohybového momentu a posouvající síly

$$\eta_3 = \frac{V_{y,Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{274}{2 \cdot 8253,69} = 0,017 \leq 0,50$$

Podmínka je splněna, nemusí se redukovat ohybový moment s ohledem na smykovou sílu. V případě, že by poměr η_3 přesáhl hodnotu 0,5, musela by se provést redukce návrhové únosnosti osově síly a ohybového momentu s ohledem na působení smykové síly.

7.9 Posudek únosnosti na příčné síly dle EN 1993-1-5 kap. 6

Příčná síla působí na kolejnici v místě styku stěny a horní pásnice průřezu a je stanovena z reakcí o vozíku:

Reakce od vlastní tíhy: $F_{G,k,Rd} = 36,95 \text{ kN}$

Reakce od užitého zatížení na ploše: $F_{Q,k,Rd} = 11,66 \text{ kN}$

Reakce od užitého zatížení od provozu: $F_{Q,k,Rd} = 27,17 \text{ kN}$

Návrhová síla příčné síly:

$$\begin{aligned} F_{d,Rd,1} &= F_{G,k,Rd} \cdot \gamma_G + F_{Q,k,Rd} \cdot \gamma_Q + F_{Q,k,Rd} \cdot \gamma_Q \cdot \psi_G \\ &= 36,95 \cdot 1,1 + 27,17 \cdot 1,2 + 11,66 \cdot 1,2 \cdot 0,95 = 86,54 \text{ kN} \end{aligned}$$

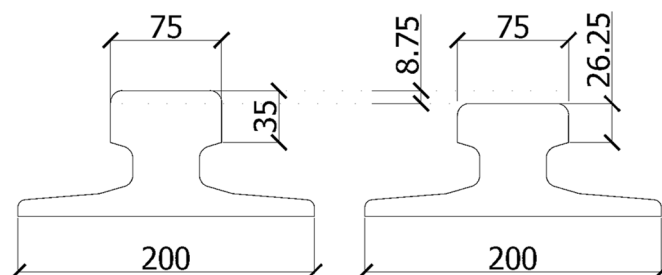
Určení roznášecí délky

Kolejnice vozíku je připojena k pásnici pomocí dvou šroubů přes profily obepínající kolejnici **A 75** a je uložena na vyvýšené ocelové desce tloušťky 30 mm umístěné na horní pásnici – toto upevnění lze považovat za posuvné a roznášecí délka se stanoví dle vztahu:

$$l_{eff} = 3,25 \left[\frac{(I_r + I_{f,eff})}{t_w} \right]^{1/3}$$

Při stanovení účinné roznášecí délky se do výpočtu musí zahrnout možné opotřebení kolejnice, které ovlivňuje jmenovitou výšku kolejnice snížením jmenovité tloušťky t_r o 25% pod pojížděným povrchem.

$$t_{eff} = 0,25 \cdot t_r = 0,25 \cdot 35 = 8,75 \text{ mm}$$



Obr. 199: Nalevo originální rozměry kolejnice A 75 a napravo efektivní rozměry kolejnice s opotřebením pod pojížděným povrchem

kolejnice	mm																kg
A 45	45	125	54	24	55	24	20	14,5	11	8	4	400	3	4	5	4	22,1
A 55	55	150	66	31	65	28,5	25	17,5	12,5	9	5	400	5	5	6	5	31,8
A 65	65	175	78	38	75	34	30	20	14	10	6	400	5	5	6	5	43,1
A 75	75	200	90	45	85	39,5	35	22	15,4	11	8	500	6	6	8	6	56,2
A 100	100	200	100	60	95	45,5	40	23	16,5	12	10	500	6	6	8	6	74,3
A 120	120	220	120	72	105	55,5	47,5	30	20	14	10	800	6	10	10	6	100,0
A 150	150	220	-	80	150	64,5	50	31,5	-	14	10	800	10	30	30	6	150,3
SD 100	100	200	100	60	95	45,5	40	23	16,5	12	9	-	6	6	8	-	75,2

Tab. 15: Charakteristiky kolejnic A 75

$$I_{r,eff} = 3,959 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \quad \text{odečteno ze software Scia Engineer}$$

$$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f = 200 + 85 + 16 = 301 \text{ mm} \geq b = 2 \cdot 15 \varepsilon t_f + t_w$$

$$= 2 \cdot 15 \sqrt{\frac{235}{355}} 16 + 12 = 402,54 \text{ mm}$$

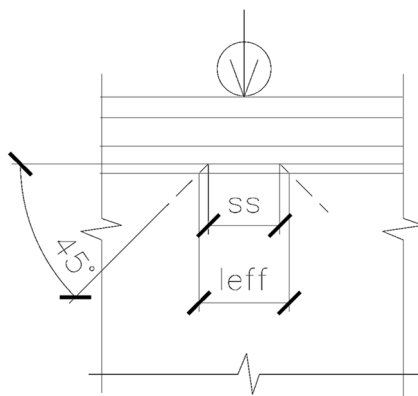
$$b_{eff} = 402,54 \text{ mm}$$

$$I_{f,eff} = \frac{1}{12} b_{eff} t_f^3 = \frac{1}{12} 402,54 \cdot 16^3 = 137400,3 \text{ mm}^4$$

$$l_{eff} = 3,25 \left[\frac{(3,959 \cdot 10^6 + 137400,3)}{12} \right]^{1/3} = 227,14 \text{ mm}$$

Roznášecí délka na horním povrchu desky:

$$s_s = l_{eff} - 2 \cdot t_f = 227,14 - 2 \cdot 16 = 195,14 \text{ mm}$$



Obr. 200: Schéma roznosu zatížení od příčné lokální síly

Další parametry potřebné pro zjištění účinné zatěžovací délky jsou stanoveny dle ČSN EN 1993-1-5 čl. 6.5.

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} = \frac{f_{yf} \cdot (2 \cdot 15 \varepsilon t_f + t_w)}{f_{yw} t_w} = \frac{355 \cdot (2 \cdot 195,27 + 12)}{355 \cdot 12} = 33,545$$

$m_2 = 0,00$... konzervativně zvoleno

$$l_y = s_s + 2 t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 195,14 + 2 \cdot 16 \cdot (1 + \sqrt{33,545 + 0}) = 412,48 \text{ mm}$$

Stanovení součinitele lokálního boulení:

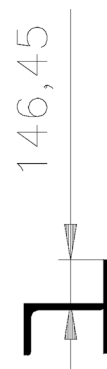
Spolupůsobící část stěny průřezu s výztuhou, která je nejbližší k zatížené pásnici:

$$15 \varepsilon t_w = 15 \sqrt{\frac{235}{355}} 12 = 146,45 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti výztuhy nejbližší k zatížené pásnici:

$$I_{sl,1} = 9,256 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{sl,1}}{h_w t_w^3} = 10,9 \frac{9,256 \cdot 10^{-5}}{1,992 \cdot 0,012^3} = 293$$



$$\gamma_s = 293 \leq 13 \left[\frac{a}{h_w} \right]^3 + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{a} \right] = 13 \left[\frac{2}{1,992} \right]^3 + 210 \left[0,3 - \frac{0,4}{2} \right] = 34,15$$

kde b_1 je světlá vzdálenost mezi zatíženou pásnicí a výztuhou subpanelu.

$$0,05 \leq \frac{b_1}{a} = \frac{0,4}{2} = 0,2 \leq 0,3$$

$$\frac{b_1}{h_w} = \frac{0,4}{1,992} = 0,2 \leq 0,3$$

$$\begin{aligned} k_F &= 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 + \left[5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \sqrt{\gamma_s} \\ &= 6 + 2 \left[\frac{1,992}{2} \right]^2 + \left[5,44 \frac{0,4}{2} - 0,21 \right] \sqrt{34,15} = 13,11 \end{aligned}$$

Kritická pružná síla:

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 \cdot 13,11 \cdot 210 \cdot 10^9 \frac{0,012^3}{1,992} \cdot 10^{-3} = 2149,41 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost při lokálním boulení:

$$\overline{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{412,48 \cdot 12 \cdot 355}{2149,41 \cdot 10^3}} = 0,904$$

Součinitel lokálního boulení:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\overline{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,904} = 0,553$$

Návrhová únosnost v lokálním boulení:

$$\begin{aligned} F_{Rd} &= \frac{f_{yw} \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{f_{yw} \cdot \chi_F \cdot L_y \cdot t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{355 \cdot 10^6 \cdot 0,553 \cdot 0,41248 \cdot 0,012}{1,15} \cdot 10^{-3} \\ &= 844,97 \text{ kN} \end{aligned}$$

Posudek na únosnost při působení lokálního břemene:

$$F_{Rd} = 844,97 \text{ kN} \geq F_{d,Rd,1} = 86,54 \text{ kN}$$

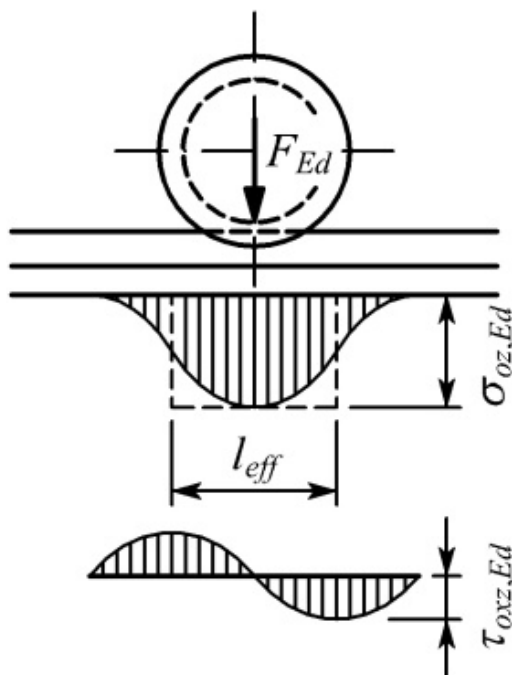
$$\eta_2 = \frac{F_{d,Rd,1}}{F_{Rd}} = \frac{86,54}{844,97} = 0,102$$

Průřez vyhovuje na namáhání lokální příčnou silou od vozíku.

Rovinné namáhání ve stěně nosníku

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} \cdot t_w} = \frac{86,54 \cdot 10^3}{227,14 \cdot 12} = 31,75 \text{ MPa}$$

$$\tau_{oz,Ed} \cong 0,2 \cdot \sigma_{oz,Ed} = 0,2 \cdot 31,75 = 6,35 \text{ MPa}$$



Obr. 201: Průběh napětí ve stěně průřezu od lokálního zatížení [19]

A) Pozice vozíku – pojezdové kolo uprostřed nosníku

Posudek podmínky plasticity HMH je proveden pro vnitřní síly maximální z jednotlivých kombinací a jim příslušných sil. Hodnoty napětí jsou stanoveny v místě napojení horní pásnice na stěnu průřezu.

Rozhodující kombinace S2_3 pro maximální ohybový moment:

$$N_{Ed,přísl} = -0,321 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Edmax} = 9,033 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 1,338 \text{ MNm}$$

$$V_{z,Ed,přísl} = 0,140 \text{ MNm}$$

Návrhové podélné normálové napětí

$$W_{y,eff,horní\ okraj\ stěny} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top} - t_f} = \frac{0,0786}{1,124 - 0,016} = 0,0709 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,horní\ okraj\ stěny} = 0,0615 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{x,Ed,M_y} = \frac{M_y}{W_{y,eff,horní\ okraj\ stěny}} = \frac{9,033}{0,0699} = 129,23 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z,Ed,M_z} = \frac{M_z}{W_{z,eff}} = \frac{1,338}{0,0615} = 21,76 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{x,Ed,N} = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{0,321}{0,0651} = 4,93 \text{ MPa}$$

Návrhové smykové napětí od posouvající síly

Průřezové charakteristiky horní pásnice (odečteno ze software Scia Engineer):

$$A_f = 4,673 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$z_t = 13 \text{ mm}$$

Vzdálenost těžiště horní tlačené pásnice a průřezu:

$$z_f = 935 - 13 = 922 \text{ mm}$$

Statický moment horní pásnice:

$$S_y = A_f \cdot z_f = 4,673 \cdot 10^{-2} \cdot 0,922 = 4,31 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot 2t_w} = \frac{0,140 \cdot 6,07 \cdot 10^{-4}}{0,10127 \cdot 2 \cdot 0,012} = 0,035 \text{ MPa}$$

Posudek dle podmínky HMM:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,Ed,M_y} + \sigma_{x,Ed,N} = 129,23 + 4,93 = 134,16 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z,Ed} = \sigma_{z,Ed,M_z} + \sigma_{oz,Ed} = 21,76 + 31,75 = 53,51 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Ed} = 6,35 + 0,035 = 6,39 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\frac{\tau_{Ed}}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left(\frac{\frac{134,16}{355}}{1,15} \right)^2 + \left(\frac{\frac{53,75}{355}}{1,15} \right)^2 - \left(\frac{\frac{134,16}{355}}{1,15} \right) \cdot \left(\frac{\frac{53,75}{355}}{1,15} \right) + 3 \left(\frac{\frac{6,39}{355}}{1,15} \right)^2 \leq 1,00$$

$$0,189 + 0,030 - 0,0376 + 0,001 = 0,182 \leq 1,00$$

VYHOVUJE.

Pro kombinaci s maximální normálovou silou je uvažována pozice vozíku, kdy se pojezdové kolo vozíku nachází ve vzdálenosti 27,3 m. Tato pozice je maximální vzdálenost pojezdu na pravou stranu nosníku.

Rozhodující kombinace S3_4 pro maximální ohybový moment:

$$N_{Ed,max} = -0,674 \text{ MN}.$$

$$M_{y,Ed,přísl} = 2,569 \text{ MNm}$$

$$M_{z,Ed,přísl} = 1,011 \text{ MNm}$$

$$V_{z,Ed,přísl} = 0,511 \text{ MNm}$$

Návrhové podélné normálové napětí

$$W_{y,eff,horní\ okraj\ stěny} = \frac{I_{y,eff}}{h_{top} - t_f} = \frac{0,0786}{1,124 - 0,016} = 0,0709 \text{ m}^3$$

$$W_{z,eff,horní\ okraj\ stěny} = 0,0615\ m^3$$

$$\sigma_{x,Ed,M_y} = \frac{M_y}{W_{y,eff,horní\ okraj\ stěny}} = \frac{2,569}{0,0699} = 36,75\ MPa$$

$$\sigma_{z,Ed,M_z} = \frac{M_z}{W_{z,eff}} = \frac{1,011}{0,0615} = 16,44\ MPa$$

$$\sigma_{x,Ed,N} = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{0,674}{0,0651} = 10,35\ MPa$$

Návrhové smykové napětí

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot 2t_w} = \frac{0,511 \cdot 6,07 \cdot 10^{-4}}{0,10127 \cdot 2 \cdot 0,012} = 0,128\ MPa$$

Posudek dle podmínky HMM:

$$\sigma_{x,Ed} = \sigma_{x,Ed,M_y} + \sigma_{x,Ed,N} = 36,75 + 10,35 = 47,10\ MPa$$

$$\sigma_{z,Ed} = \sigma_{z,Ed,M_z} + \sigma_{oz,Ed} = 16,44 + 31,75 = 48,19\ MPa$$

$$\tau_{Ed} = 6,35 + 0,128 = 6,478\ MPa$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \right)^2 \leq 1,00$$

$$\left(\frac{47,10}{\frac{355}{1,15}} \right)^2 + \left(\frac{48,19}{\frac{355}{1,15}} \right)^2 - \left(\frac{47,10}{\frac{355}{1,15}} \right) \cdot \left(\frac{48,19}{\frac{355}{1,15}} \right) + 3 \left(\frac{6,478}{\frac{355}{1,15}} \right)^2 \leq 1,00$$

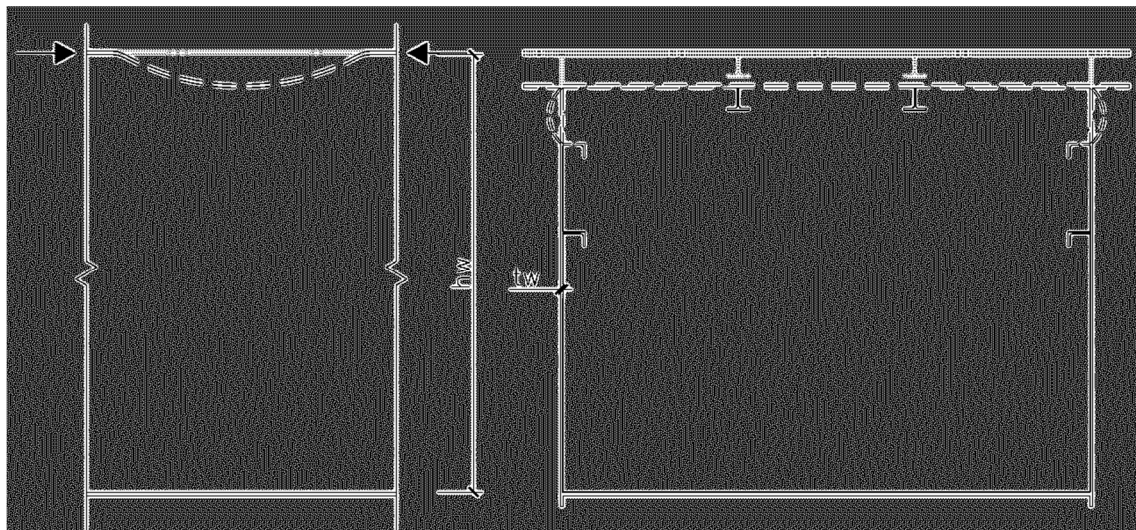
$$0,023 + 0,024 - 0,024 + 0,001 = 0,024 \leq 1,00$$

VYHOVUJE.

Pro všechny ostatní polohy vozíku lze prohlásit, že napětí ve stěně průřezu jistě vyhoví na podmínku HMM.

7.10 Posouzení boulení stěny od ohybu tlačené pásnice

Posouzení v souladu s normou ČSN EN 1993-1-5 podle kapitoly 8 [8] musí prokázat, že stěna nosníku má dostatečnou štíhlost, aby zajistila tuhé podepření pásnice a nedocházelo k vtlačování pásnice při ohybu do stěny průřezu.



Obr. 203: Vtlačení stojiny do pásnice

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (10)$$

kde A_w je průřezová plocha stěny nosníku (konzervativně se uvažuje stěna nevyztužena podélnými výztuhami), A_{fc} je účinná průřezová plocha tlačené pásnice a součinitel k se uvažuje pro průřezy třídy 4 hodnotou 0,55.

Průřezové charakteristiky (odečteno ze software Scia Engineer)

$$A_w = 4,763 \cdot 10^{-2} \cdot m^2$$

$$A_{fc} = 1,172 \cdot 10^{-2} \cdot m^2$$

Posudek

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{1992}{12} = 166 \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210\,000}{355} \sqrt{\frac{4,763 \cdot 10^4}{1,172 \cdot 10^4}} = 655,89$$

Stěna průřezu **vyhovuje** na vyboulení pásnice od ohybu, zajišťuje nevtažení pásnice do stěny.

7.11 Interakce mezi příčnou silou, ohybovým momentem a osovou silou

Jelikož je konstrukce namáhána ohybovým momentem, osovou silou a příčnou silou od účinků pojezdu vozíku po kolejnicích umístěných na horná pásnici nosníku, je zapotřebí posoudit také jejich vzájemnou interakci dle vztahu:

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4. \quad (11)$$

Pro ohybový moment kolem osy y:

$$\eta_2 = \frac{F_{d,Rd,1}}{F_{Rd}} = \frac{86,54}{844,97} = 0,102$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ &= \frac{0,321}{20,10} + 1,00 \frac{9,033 + 0,060}{21,580} + 0,60 \frac{1,338 + 0,016}{18,98} = \\ &= 0,016 + 0,421 + 0,043 = 0,480 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}}}{\gamma_{M1}} = \\ &= \frac{0,321}{20,10} + 0,60 \frac{9,033 + 0,060}{21,580} + 1,00 \frac{1,338 + 0,016}{18,98} = \\ &= 0,016 + 0,253 + 0,072 = 0,341 \leq 1,0 \end{aligned}$$

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4.$$

$$0,102 + 0,8 \cdot 0,480 = 0,486 \leq 1,4.$$

Nosník vyhovuje na kombinaci interakci příčné síly, ohybového momentu a tlakové síly.

Pro ohybový moment kolem osy z:

$$\eta_2 = \frac{F_{d,Rd,1}}{F_{Rd}} = \frac{86,54}{844,97} = 0,102$$

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\
&= \frac{0,068}{20,10} + 1,00 \frac{5,508 + 0,013}{21,58} + 0,60 \frac{2,827 + 0,003}{18,98} = \\
&= 0,003 + 0,256 + 0,089 = 0,348 \leq 1,0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\
&= \frac{0,068}{20,10} + 0,60 \frac{5,508 + 0,013}{21,58} + 1,00 \frac{2,827 + 0,003}{18,98} = 0,003 + 0,154 + 0,148 \\
&= 0,305 \leq 1,0
\end{aligned}$$

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4.$$

$$0,102 + 0,8 \cdot 0,348 = 0,380 \leq 1,4.$$

Nosník vyhovuje na kombinaci interakci příčné síly, ohybového momentu a tlakové síly.

Maximální normálová síla

$$\eta_2 = \frac{F_{d,Rd,1}}{F_{Rd}} = \frac{86,54}{844,97} = 0,102$$

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\
&= \frac{0,673}{20,10} + 1,00 \frac{2,587 + 0,127}{21,58} + 0,60 \frac{1,101 + 0,033}{18,98} = \\
&= 0,033 + 0,126 + 0,036 = 0,195 \leq 1,0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \\
&= \frac{0,673}{20,10} + 0,60 \frac{2,587 + 0,127}{21,58} + 1,00 \frac{1,101 + 0,033}{18,98} = \\
&= 0,033 + 0,076 + 0,06 = 0,169 \leq 1,0
\end{aligned}$$

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4.$$

$$0,102 + 0,8 \cdot 0,195 = 0,258 \leq 1,4.$$

7.12 Posudek svarového přípoje pásnice a stěny

Krční svar průřezu v místě připojení stěny na pásnici je navrhnutý podle doporučeně v normě ČSN EN 1993-1-5 podle kapitoly 9.3.5

Jestliže je splněna podmínka:

$$V_{z,Ed} \leq \chi_w h_w t_w \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$$

$$V_{z,Ed} = 852 \text{ kN} \leq \chi_w h_w t_w \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} = 1,20 \cdot 2,008 \cdot 0,012 \cdot \frac{355 \cdot 10^6}{1,15 \cdot \sqrt{3}} = 5153,43 \text{ kN}$$

může se svar pásnice navrhnout na smykový tok podle vztahu:

$$v_{II}' = \frac{V_{z,Ed}}{h_w} = \frac{852/2}{2,008} = 212,15 \text{ kN/m}.$$

Tloušťka stěny průřezu je $t_w = 12 \text{ mm}$ dle konstrukčních zásad je minimální účinná výška svaru $a = 4 \text{ mm}$.

$$v_{II} = \frac{v_{II}'}{2a} = \frac{212,15}{2 \cdot 0,004} = 26,519 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{y,wd} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{510 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 1,3 \cdot \sqrt{3}} = 251,67 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

$$v_{II} = 26,519 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2 \leq f_{y,wd} = 251,67 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$$

Svar s účinnou výškou 4 mm vyhovuje.

7.13 Posudek hlavního nosníku na MSP

Pro posouzení druhého mezního stavu s ohledem na použitelnost konstrukce, tedy na vizuální průhyby a deformace konstrukce, byly v software Scia Engineer vytvořeny kombinace zatížení s dílčími součiniteli odpovídajícími tomuto stavu, tedy charakteristickým hodnotám zatížení konstrukce a je

uvažováno pouze od zatížení proměnných. Konstrukce musí splňovat požadavky mezního stavu použitelnosti, které zahrnují požadavek, aby konstrukce zůstala v pružném stavu, vlastní frekvence nesmí překročit limitní hodnotu, detaily musí být navrženy s ohledem na trvanlivost, korozi a možné opotřebení a konstrukce by měla být snadno udržitelná. Posudek průhybu je proveden pro proměnná zatížení.

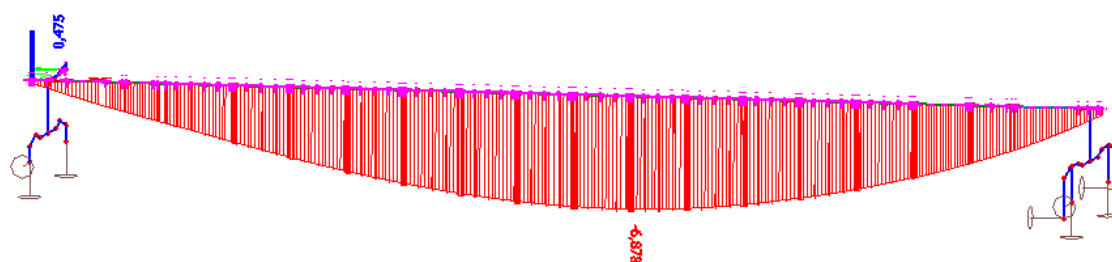
Svislý průhyb:

$$\delta_{ser} = \frac{L}{250} = \frac{34000}{250} = 136 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} = 6,878 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 136 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 6,878 \text{ mm}$$

Konstrukce vyhovuje na svislý průhyb.



Obr. 204: Svislá deformace konstrukce od proměnných zatížení

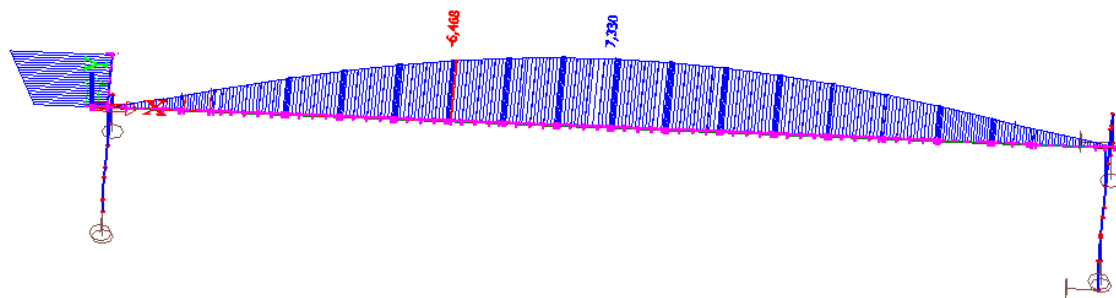
Vodorovný průhyb:

$$\delta_{ser} = \frac{L}{250} = \frac{34000}{250} = 136 \text{ mm}$$

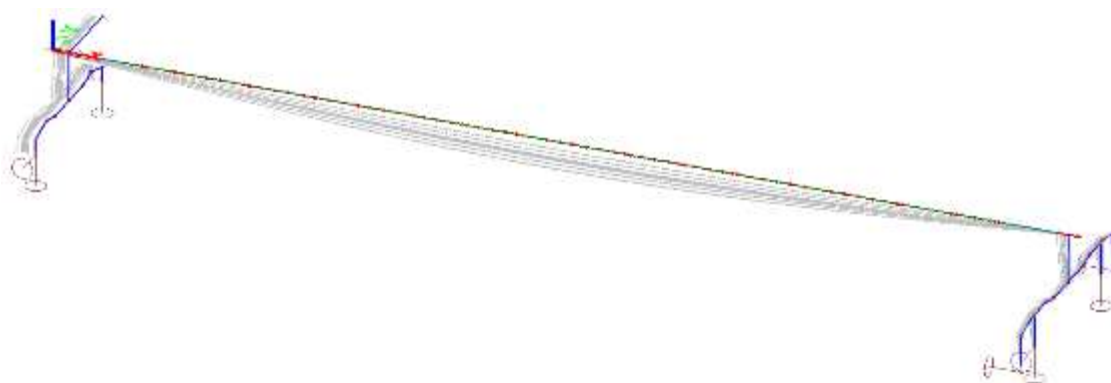
$$\delta_{max} = 7,303 \text{ mm}$$

$$\delta_{ser} = 136 \text{ mm} \geq \delta_{max} = 7,303 \text{ mm}$$

Konstrukce vyhovuje na vodorovný průhyb.



Obr. 205: Vodorovná deformace konstrukce od proměnných zatížení



Obr. 206: Tvary deformované konstrukce pro proměnná zatížení

8 Statická analýza metodou konečných prvků

Konstrukce, která vykazuje geometrické charakteristiky či polohu zatížení takovou, že s velkou pravděpodobností dojde ke vzniku boulení ať už lokálního či celkového, lze posoudit pomocí analýzy MKP. Návod na posouzení udává norma ČSN EN 1993-1-5 v příloze C. Za vhodně zvolených podmínek (vhodná síť konečných prvků, správný model konstrukce včetně okrajových podmínek) lze pro konstrukci zavést imperfektní počáteční tvar na základě prvotní stabilitní analýzy a po provedení geometricky nelineárního pružnostní analýzy a uvažováním počátečního imperfektního tvaru (GNIA) lze posoudit konstrukci s ohledem na pružnou únosnost stěny při boulení.

Imperfekce lze pro numerický model uvažovat geometrické nebo materiálové a společné působící. V případě potřeby zavedení geometrické imperfekce lze pomocí stabilitní analýzy konstrukce získat vlastní tvary, které reprezentují možné boulení, vybočení případně i zkroucení jednotlivých prvků nebo panelů

konstrukce. Pro tyto tvary pomocí tab. C. 2 v [10] se aplikuje předpoklad tzv. ekvivalentních geometrických imperfekcí, pomocí kterých se stabilitnímu tvaru udělí jeho velikost a získá se konstrukce s počátečním imperfektním tvarem, kterou již můžeme podrobit nelineární statické analýze. Pokud by bylo zapotřebí konstrukci řešit s ohledem na možné materiálové imperfekce do charakteristik materiálu by se uvažoval obrazec napětí (pracovní diagram) odpovídající výrobě, případně jiným předpokladům chování materiálu.

V následující části diplomové práce je provedena statická analýza konstrukce nosníku mostového shrnovače borité rudy s ohledem na počáteční geometrické imperfekce i materiálové imperfekce.

8.1 Skořepinový model konstrukce

Konstrukce nosníku je modelována pomocí 3D skořepinového numerického modelu v software Scia Engineer. Model je vytvořený střednicemi jednotlivých ploch všech komponent, které jsou součástí hlavního nosníku (včetně simulování přírubového spoje nosníku k vahadlům, ale se zanedbáním podkladních plechů pod kolejnicemi), v software AutoCad a následně je importován do software Scia Engineer, kde jsou jednotlivým plochám přiřazeny odpovídající tloušťky (viz projektová dokumentace [20]). Velká pozornost při tvorbě obdobného modelu se musí věnovat správnému propojení jednotlivých ploch v místech průniků jednotlivých střednic. Konstrukce je podepřena v místě uložení vahadel na kolejnice (totožné uložení s prutovým modelem), proto je skořepinový model doplněn pruty reprezentujícími ukončení a uložení vahadel. Těmto prutům je přiřazen materiál se zvýšenou tuhostí, aby nedocházelo k přenosu napjatosti do konstrukce nosníku. Skořepinový model je zatížený dominantním namáháním, které se stanovilo podle výsledků na prutovém modelu nosníku pro vyvození maximálních vnitřních sil na nosníku.

8.2 Zvolené kombinace zatížení

Konstrukce je zatížena stejným zatížením, jako je uvažováno pro prutový model v kapitole 7. Na skořepinový model není uvažováno seismické zatížení.

Obsah kombinací pro maximální vnitřní síly:

Maximální normálová síla N

Tato kombinace obsahuje vlastní tíhu konstrukce, tíhu od vozíku, který se nachází v poloze P2 tedy uprostřed nosníku. Zatížení vznikající od provozu technologie na konstrukci.

Maximální posouvající síla V_y

Pro vyvození maximální posouvající síly ve směru osy y obsahuje kombinace vlastní tíhu konstrukce, tíhu od vozíku, který se nachází v poloze P3 (napravo ve vzdálenosti maximálního pojezdu). Zatížení vznikající od provozu technologie na konstrukci.

Maximální posouvající síla V_z

Kombinace, při které vzniká maximální posouvající síla ve směru osy z zahrnuje vlastní tíhu konstrukce, tíhu od vozíku, který se nachází v poloze P1 (nalevo ve vzdálenosti maximálního pojezdu). Zatížení vznikající od provozu technologie na konstrukci a zatížení užité na pochozích plochách konstrukce vozíku.

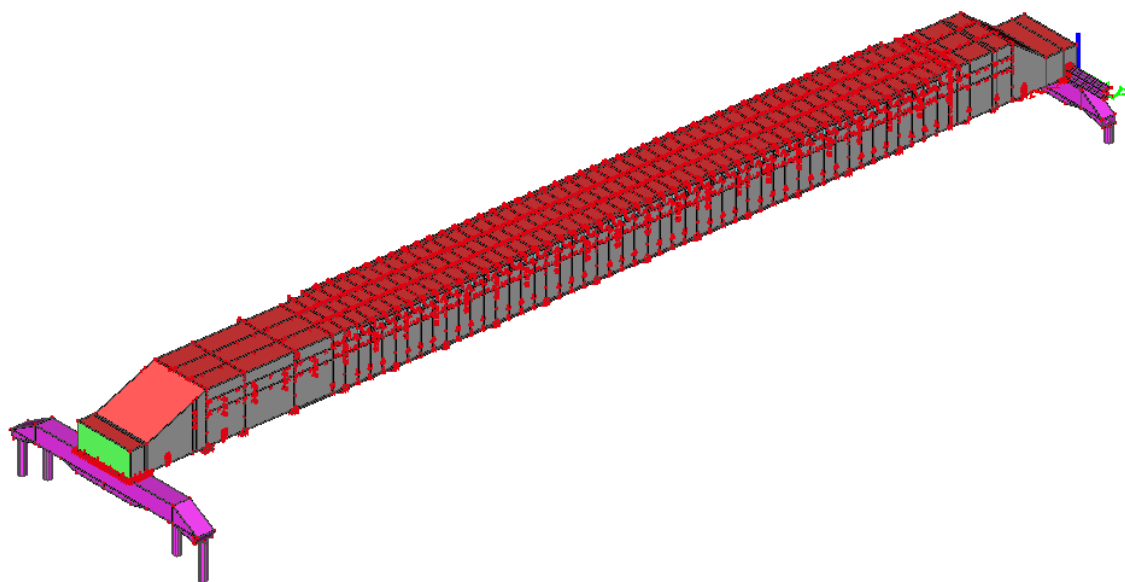
Maximální ohybový moment M_y a M_z

Maximální ohybové momenty vznikají od kombinace zatížení, ve které se nachází vlastní tíha konstrukce, tíha od vozíku, který se nachází v poloze P2 (uprostřed nosníku). Zatížení vznikající od provozu technologie na konstrukci a zatížení užité na pochozích plochách konstrukce vozíku.

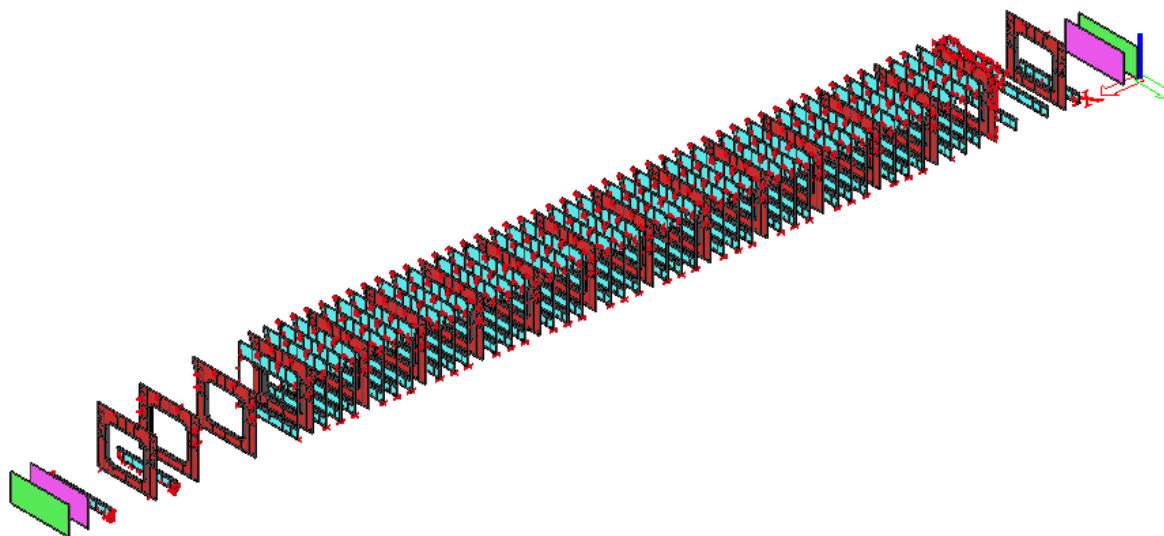
8.3 Zatížení skořepiny v software Scia Engineer

- **Stálé zatížení - vlastní tíha nosníku**

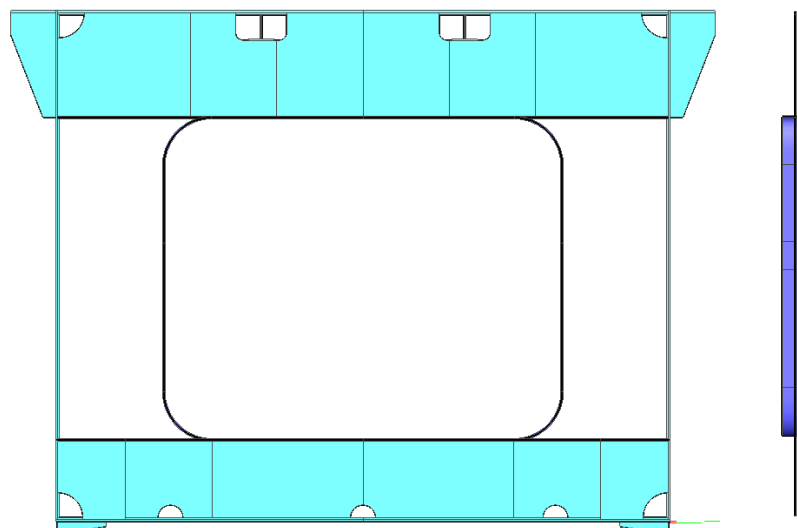
Vlastní tíha skořepiny je vygenerována automaticky pomocí software Scia Engineer pro odpovídající tloušťky a plochy deskostěnových prvků. Ostatní stálá zatížení, která jsou způsobená zařízením umístěným na konstrukci, jsou zahrnuta v následujících zatěžovacích stavech. Pro vahadla je nastaven materiál s nulovou hmotností, jelikož nejsou modelovány přesně pouze jako úložné podpůrné konstrukce.



Obr. 207: Skořepinový model celé konstrukce



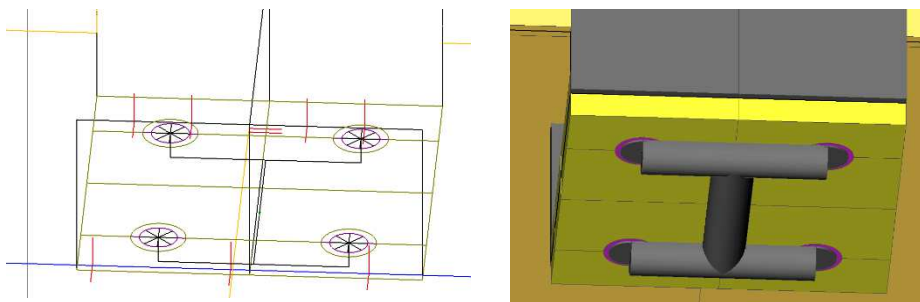
Obr. 208: Skořepinový model příčných výztuh nosníku



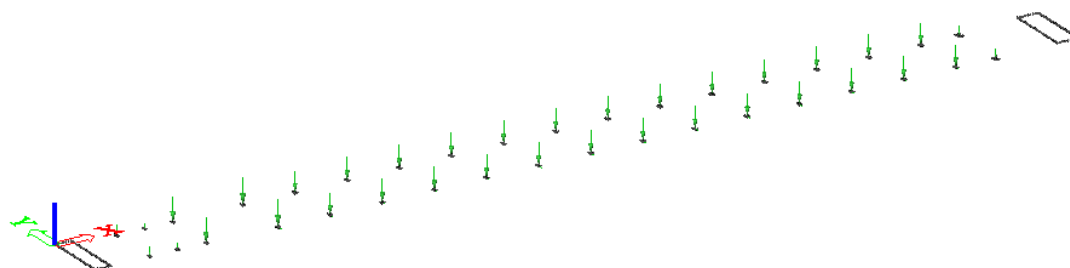
Obr. 209: Detail hlavní příčné výztuhy (vlevo pohled, vpravo řez)

- **Stálé zatížení - vlastní tíha od konstrukce vyhrnovacího řetězu**

Vlastní tíha od konstrukce vyhrnovacího řetězu byla zavedena do míst montážních spojů s čelní deskou pomocí reakcí získaných statickou analýzou konstrukce vyhrnovacího řetězu viz kapitola 6. Pro roznos bodové reakce mezi čtyři šrouby se vytvořila pomocná konstrukce z tuhých prutů znázorněna na obrázku č. 210.



Obr. 210: Pomocná konstrukce pro roznos bodové reakce

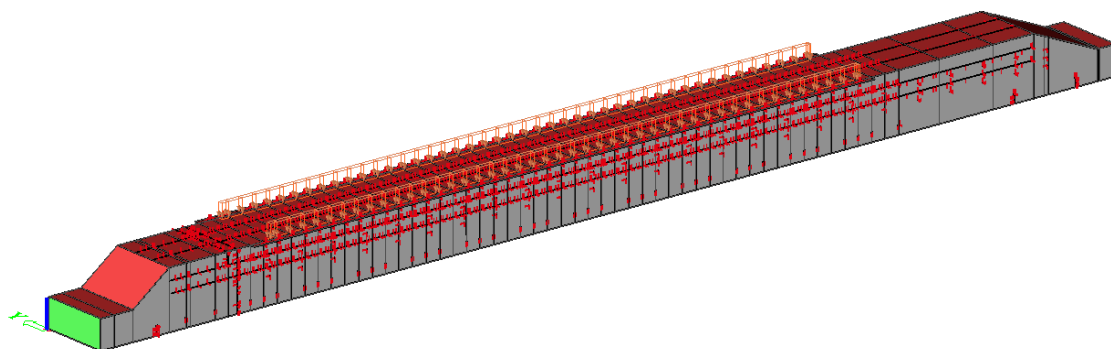


Obr. 211: Zatěžovací stav od vlastní tíhy konstrukce vyhrnovacího řetězu

- **Stálé zatížení - vlastní tíha kolejnice**

Hmotnost kolejnice A 75 je $g = 56,2 \text{ kg/m}$. Uložení kolejnice je na podkladovém plechu tl. 30 mm a šířky 320 mm. Kolejnice je uložena od levého vahadla ve vzdálenosti 6,3 m až do 28,1 m délky nosníku. Zatížení vlastní tíhou kolejnice je uvažováno jako plošné zatížení v úrovni horní pásnice nosníku. Zatížení je v software Scia Engineer aplikováno jako volné na ploše rozsahu délky kolejnice a šířce podkladního plechu. Celkové plošné zatížení na ploše šířky 320 mm je:

$$g = \frac{56,20}{100} \cdot \frac{1}{0,32} = 1,76 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 212: Zatěžovací stav vlastní tíha kolejnice A 75

- **Stálé zatížení - vlastní tíha vozíku**

Vlastní tíha vozíku je do modelu zavedena jako reakce roznesená do plochy podkladního plechu pod kolejnicí šířky 80 x 320 mm. Působí jako zatížení volné na horní pásnici průřezu. Reakce od vlastní tíhy vozíku jsou na konstrukci uvažovány ve třech polohách (nalevo ve vzdálenosti maximální pojezdu, napravo ve vzdálenosti maximálního pojezdu vozíku a cca uprostřed nosníku) totožně se zatížením prutového modelu.

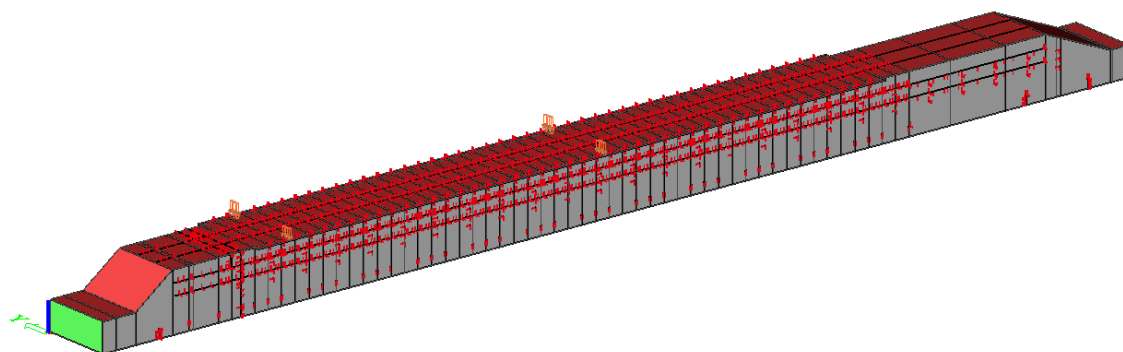
$$A = 0,08 \cdot 0,32 = 0,0256 \text{ m}^2$$

$$q_{1L} = \frac{34,00}{0,0256} = 1328,13 \text{ kN/m}^2$$

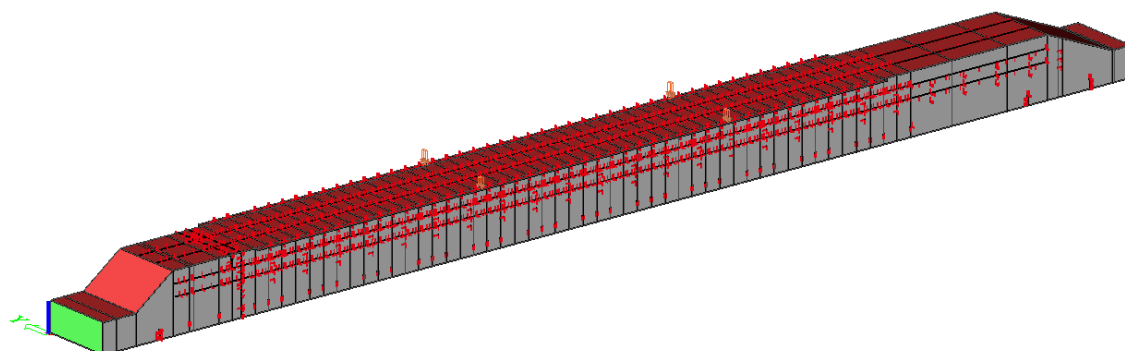
$$q_{2L} = \frac{26,100}{0,0256} = 1019,53 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{1P} = \frac{37,00}{0,0256} = 1445,31 \text{ kN/m}^2$$

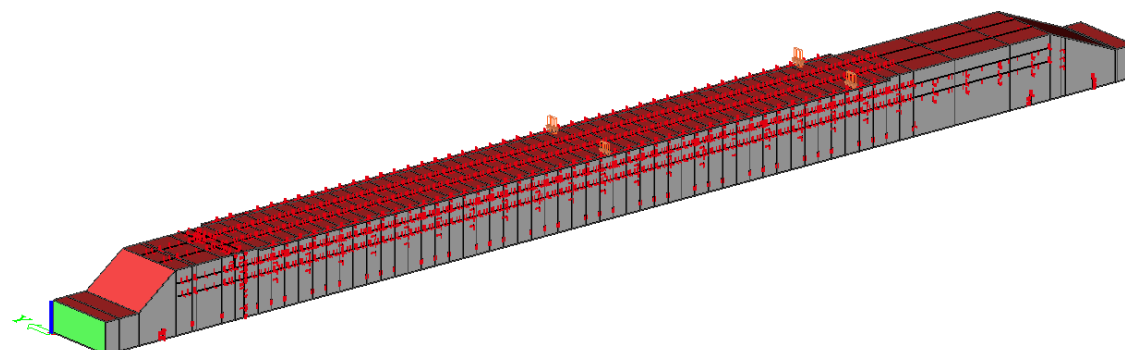
$$q_{2P} = \frac{29,28}{0,0256} = 1143,75 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 213: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P1



Obr. 214: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P2



Obr. 215: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P3

- **Stálé zatížení – vlastní tíha od technologického zařízení**

Na konstrukci je umístěna rozvodna, která je situována v levé části konstrukce. Je uvažováno uložení a roznos vlastní tíhy od rozvodny na ploše 2 412 x 2 060 mm.

$$A = 2,412 \cdot 2,06 = 4,97 \text{ m}^2$$

$$q_R = \frac{100}{4,97} = 20,121 \text{ kN/m}^2$$

Na pravé straně se nachází kabina, která je připojena k nosníku shrnovače pomocí spoje s čelními deskami s rozměry 200 x 200 mm. Zatížení od kabiny bylo zadáno pomocí dvou osamělých sil velikosti 10 kN, tyto síly je zapotřebí rozpočítat jako spojitě plošné zatížení působící na čelní desku.

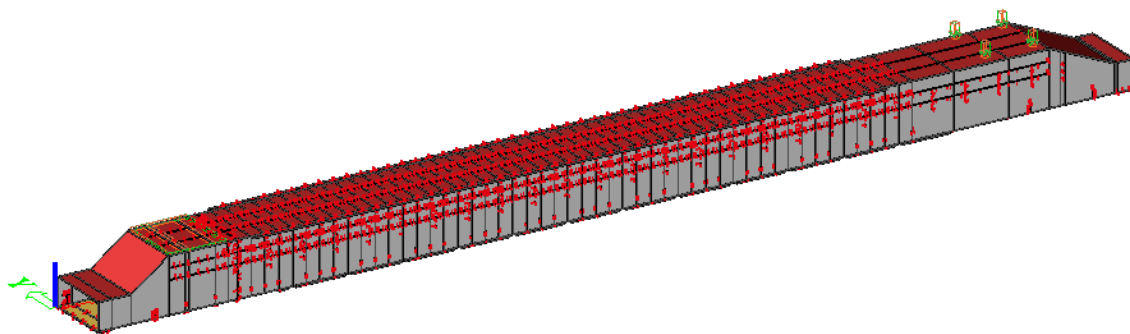
$$A = 0,2 \cdot 0,2 = 0,04 \text{ m}^2$$

$$q_K = \frac{5}{0,04} = 125,00 \text{ kN/m}^2$$

V místě spodní pásnice se nachází u vahadla s příčnou podporou výsypka, která zatěžuje nosník jak vlastní tíhou tak tíhou od materiálu, která je zahrnuta v zatížení proměnných popsanych níže. Plocha, na které se zatížení od výsypky roznáší, je stanovena v rozměrech 1 011 x 2030 mm.

$$A = 1,011 \cdot 2,03 = 2,05 \text{ m}^2$$

$$q_K = \frac{10}{2,05} = 4,88 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 216: Zatěžovací stav vlastní tíha od technologického zařízení

Zatížení od bubnu, který je uložen na konzole připojené k uzavřenému krajnímu průřezu nad levým vahadlem je zadána jako bodová síla v hodnotě 20 kN na skořepinový nosník.

Velikost od vlastní tíhy žebříků a pochozích roštů pro údržbu je vzhledem k ostatnímu působícímu zatížení na konstrukci zanedbatelná.

- **Proměnné zatížení – vozík v pracovním procesu**

Proměnné zatížení zahrnuje reakce od vozíku při pracovním procesu s bránou v pracovní poloze, které jsou umístěny opět do tří hlavních pozic na nosník shrnovače. Uvažuje se stejná plocha pro roznos zatížení jako u zatížení stálého od vlastní tíhy vozíku. Součástí zatížení od vozíku při provozu stroje je síla působící v podélném směru od pojezdu vozíku ve velikosti 94 kN, která je zavedena jako liniové zatížení v úrovni horní pásnice

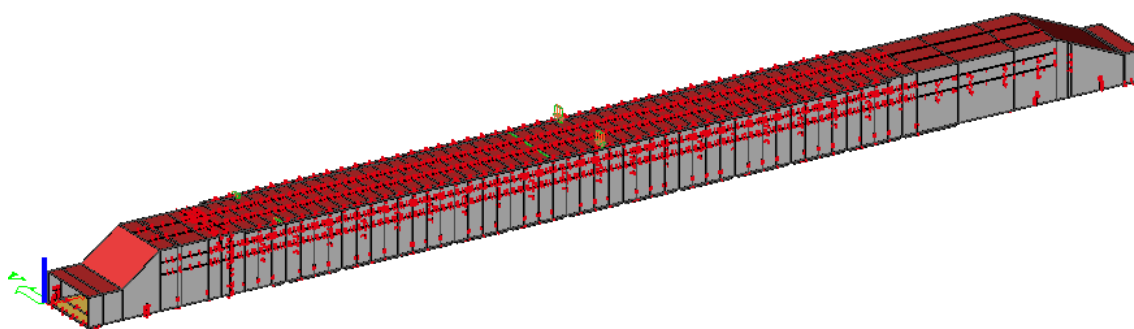
$$A = 0,08 \cdot 0,32 = 0,0256 \text{ m}^2$$

$$q_{1L} = \frac{6,91}{0,0256} = 269,92 \text{ kN/m}^2$$

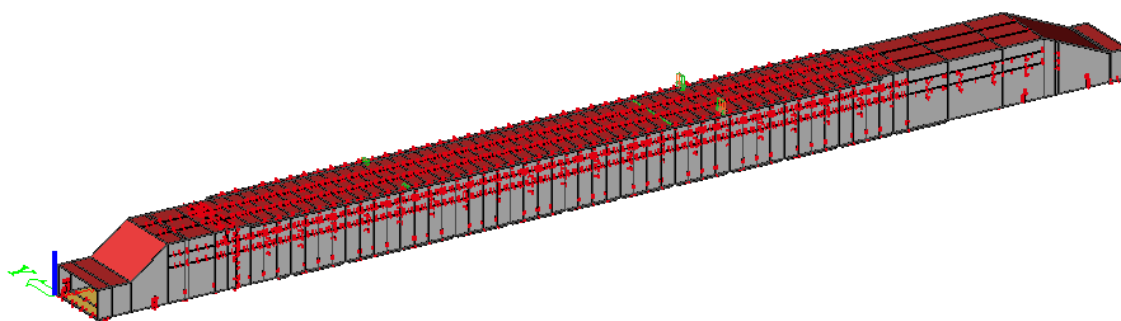
$$q_{2L} = \frac{25,52}{0,0256} = 996,88 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{1P} = \frac{5,72}{0,0256} = 223,44 \text{ kN/m}^2$$

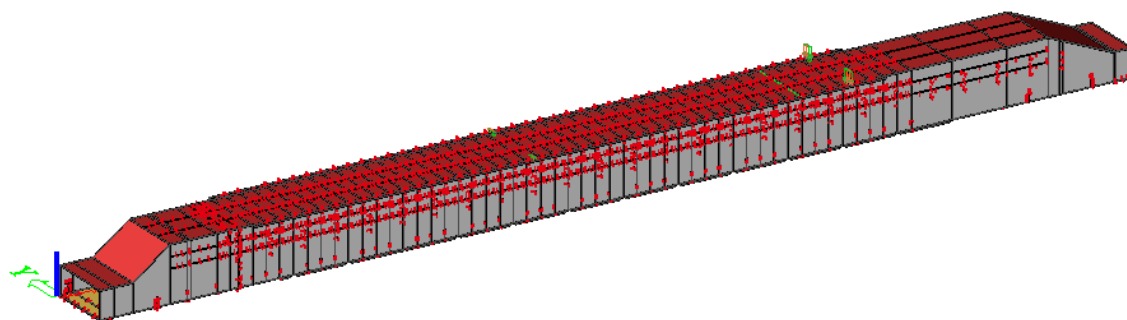
$$q_{2P} = \frac{26,80}{0,0256} = 1046,88 \text{ kN/m}^2$$



Obr. 217: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1



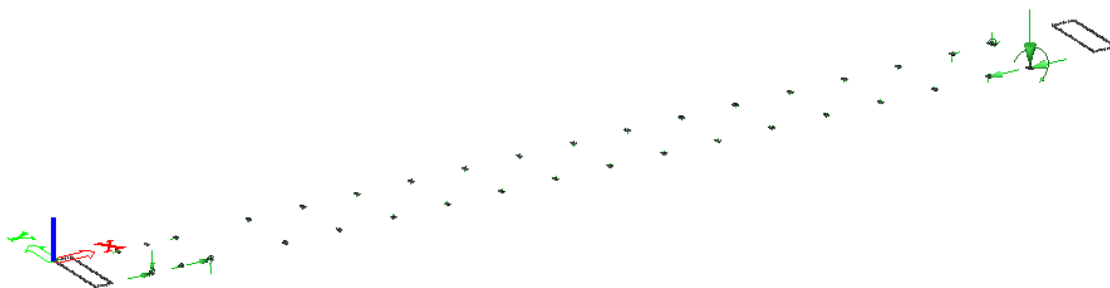
Obr. 218: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1



Obr. 219: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1

- **Proměnné zatížení – provoz vyhrnovacího řetězu**

Zatížení od pracovního provozu konstrukce pro vyhrnovací řetěz je zavedeno jako bodové zatížení na pomocné konstrukce popsané v kapitole pro zatížení stálé. Je důležité dát pozor na správné umístění reakcí, jelikož zatížení od řetězu působí jedním směrem a jedna strana konstrukce je více zatížena z důvodu umístění technologie na této straně.



Obr. 220: Zatěžovací stav od provozu konstrukce pro vyhrnovací řetěz

- **Proměnné zatížení – materiál ve výsypce**

V místě spodní pásnice se nachází u vahadla s příčnou podporou výsypka, která zatěžuje nosník vysypávaným materiálem borité rudy. Plocha, na které se zatížení od výsypky roznáší, je stanovena v rozměrech 1 011 x 2030 mm.

$$A = 1,011 \cdot 2,03 = 2,05 \text{ m}^2$$

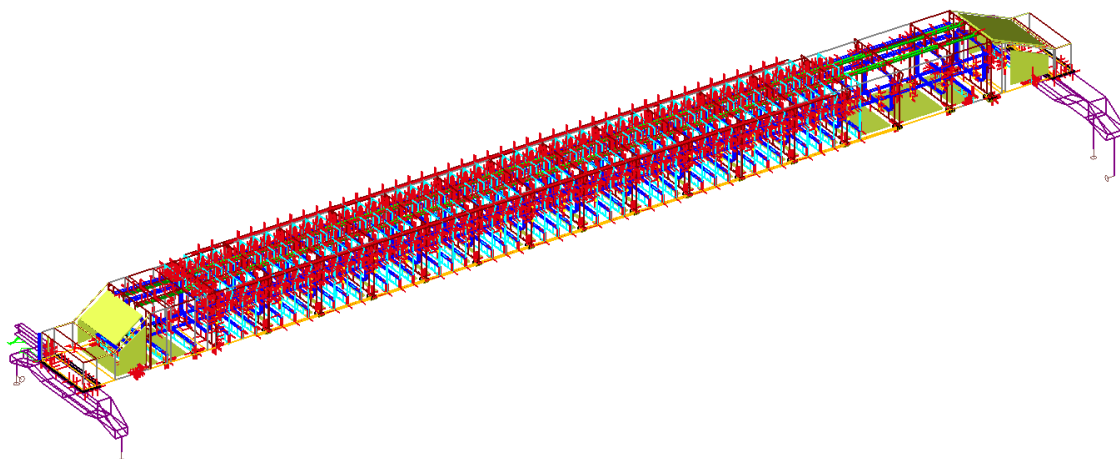
$$q_K = \frac{20}{2,05} = 9,76 \text{ kN/m}^2$$

8.4 Kombinace zatěžovacích stavů

Kombinace zatěžovacích stavů (při kterých vznikají maximální vnitřní síly, které jsou popsány výše) pro lineární, stabilitní a nelineární statickou analýzu konstrukce byly sestaveny podle kombinačního pravidla uvedeného v normě ČSN 27 7008 s použitím příslušných dílčích a kombinačních součinitelů, které jsou uvedeny v kapitole 7.2.

8.5 Stabilitní analýza konstrukce

Pro zjištění počátečních imperfektních tvarů konstrukce je v software Scia Engineer nejprve provedena stabilitní analýza konstrukce pro rozhodující kombinace zatížení pro jednotlivé vnitřní síly. Imperfektní tvary lze stanovit právě pomocí stabilitní analýzy nebo lze ručně namodelovat vyboulení jednotlivých vhodně zvolených panelů s ohledem na namáhání. Konstrukci byla nastavena vhodná síť, která byla v určitých místech, především v oblasti očekávaného vyboulení, zjemněna podle potřeby (plošně a kolem hran). V následujícím pokračování kapitoly jsou rozebrány a popsány jednotlivé stabilitní stavy konstrukce, které budou použity pro vyhodnocení napjatosti konstrukce s počátečními geometrickými imperfekcemi (GNIA).

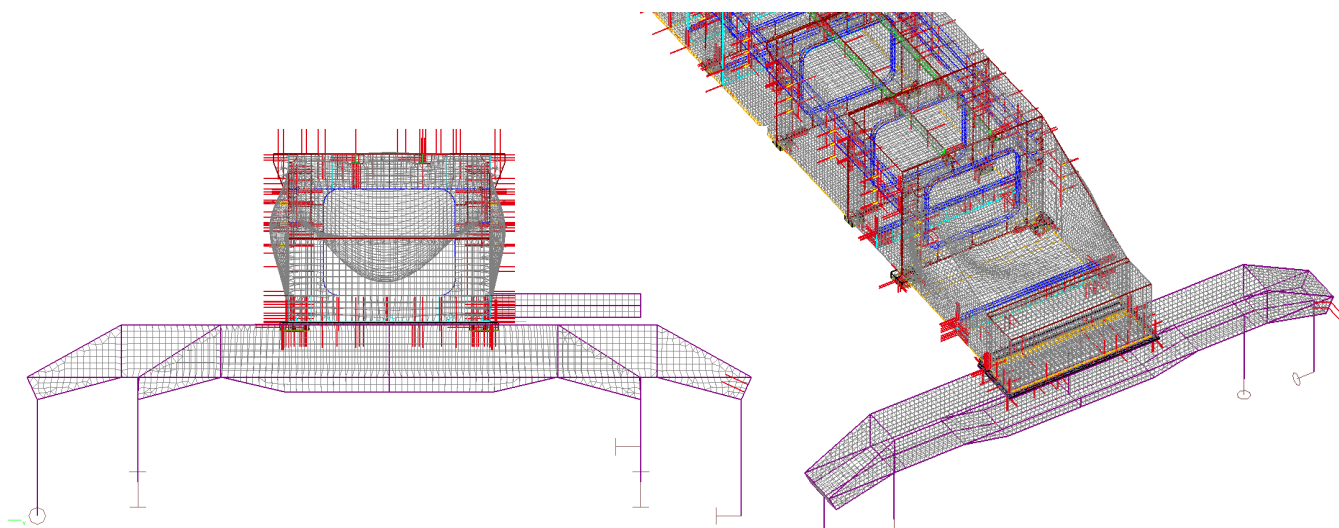


Obr. 221: Lokální zjemnění sítě konečných prvků

8.5.1 Stabilitní tvary kombinace pro maximální smykovou sílu V_z

V následující kapitole budou popsány stabilitní tvary pro kombinaci při které vzniká maximální posouvající síla na prutovém modelu ve směru osy z V_z . Z těchto tvarů jsou vybrány tvary kritické, pro které jsou stanoveny geometricky nelineární analýzou srovnávací napětí splňující plasticitní podmínku HMM, výsledky a využití jednotlivých konstrukčních částí nosníku jsou uvedeny v kapitole 8.6.1.

V prvním stabilitním tvaru dochází k vyboulení horní pásnice v místě náběhu na okraji průřezu včetně vyboulení stěn konstrukce. Tvar vyboulení je způsoben kombinací namáhání velkým smykovým napětím a normálovým napětím od ohybového momentu kolem osy y.



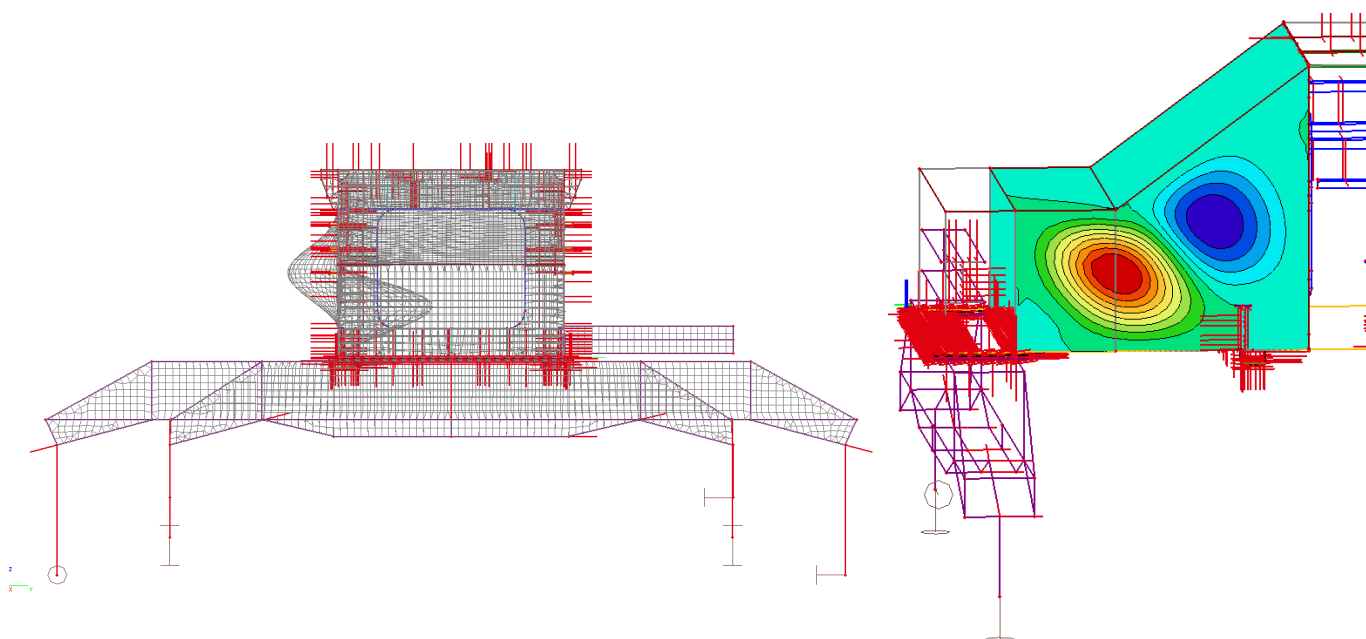
Obr. 222: První stabilitní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z

Tento stabilitní tvar se opakuje i pro ostatní kombinace vyvolující maximální vnitřní síly s mírně rozdílnou hodnotou kritického násobitele zatížení, který pro tuto kombinaci nabývá hodnoty $\alpha_{cr} = 3,05$. Rozhodující boulicí panel horní pásnice má rozměry 2 412 x 2 553 mm, které vymezují příčné výztuhy průřezu v místě horní pásnice a stěny. Hodnota ekvivalentní geometrické imperfekce se stanoví dle tab. C.2 [8]:

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{2\,553}{200}; \frac{2\,412}{200}\right) = \min(12,8; 12,06) = 12,06 \text{ mm}$$

Tato hodnota je přiřazena stabilitnímu tvaru a určuje rozměry počáteční imperfektní konstrukce při vyboulení horní pásnice v místě pravého vahadla. První stabilitní tvar konstrukce je určen jako kritický a je posouzen pomocí geometricky nelineární analýzy.

Druhý stabilitní tvar je lokalizován na opačné straně nosníku než první, dochází především k vyboulení stěny nosníku s tloušťkou 12 mm v kombinaci s vyboulením horní pásnice. Rozhodující vyboulení je právě stěny, které nejpravděpodobněji vzniká od lokálního namáhání smykovým napětím v důsledku zatížení prvního závěsu velkými reakcemi od konstrukce vyhrnovacího řetězu.



Obr. 223: Druhý stabilitní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z (vpravo deformace ve směru osy y)

Kritický násobitel zatížení dosahuje hodnoty $\alpha_{cr} = 3,66$. Ekvivalentní geometrická imperfekce je stanovena pro rozměry boulící oblasti panelu stěny konstrukce, jejíž rozměry jsou stanoveny odhadem:

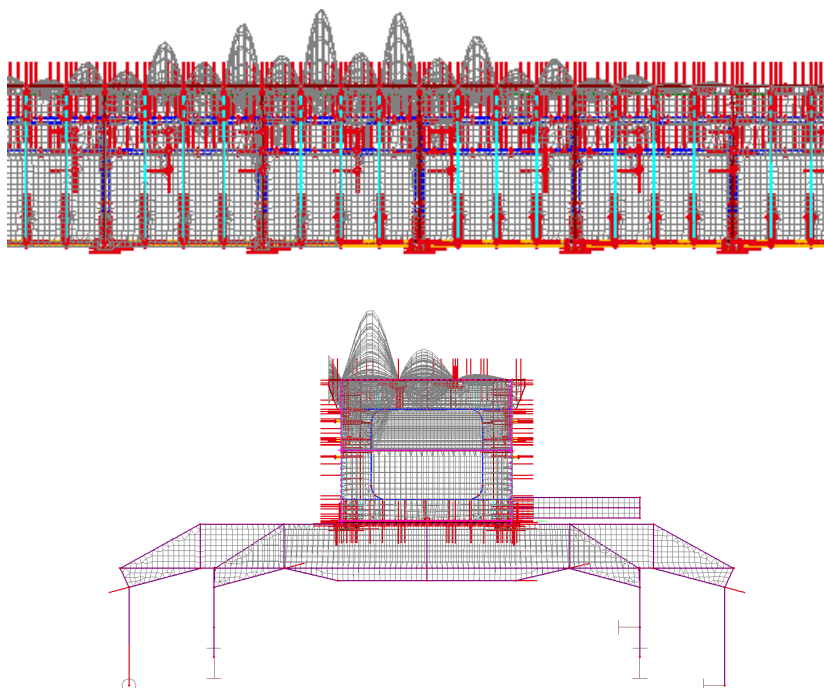
$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{1\,246}{200}; \frac{1\,000}{200}\right) = \min(6,23; 5,00) = 5,00 \text{ mm}$$

Tento tvar je zvolený pro posudek napjatosti v konstrukci.

Třetí stabilitní tvar konstrukce vykazuje podobné (avšak trochu složitější s více sinusovými půlvlnami) vyboulení stěny jako druhý tvar. Čtvrtý stabilitní tvar má obdobné vyboulení jako tvar první s kritickým násobitelem zatížení

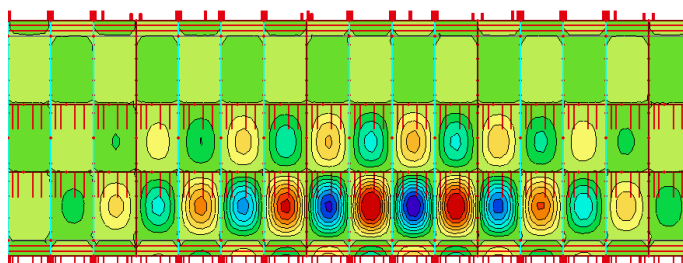
$\alpha_{cr} = 4,05$. Tvary vyboulení panelu do devátého stabilitního tvaru se situují do míst předchozích tvarů, pouze se zesložitují vyboulené tvary konstrukčních částí. Proto tyto tvary byly vyhodnoceny jako tvary s menší kritickou váhou než první dva.

Tvar devátý vykazuje lokální vyboulení tlačené horní pásnice v kombinaci s ohybovým momentem kolem osy z. Tvar má kritický násobitel zatížení $\alpha_{cr} = 6,38$.



Obr. 224: Devátý stabilitní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z

Rozhodující hodnoty deformace má subpanel horní tlačené pásnice, který je podepřený příčnými a podélnými výztuhami.



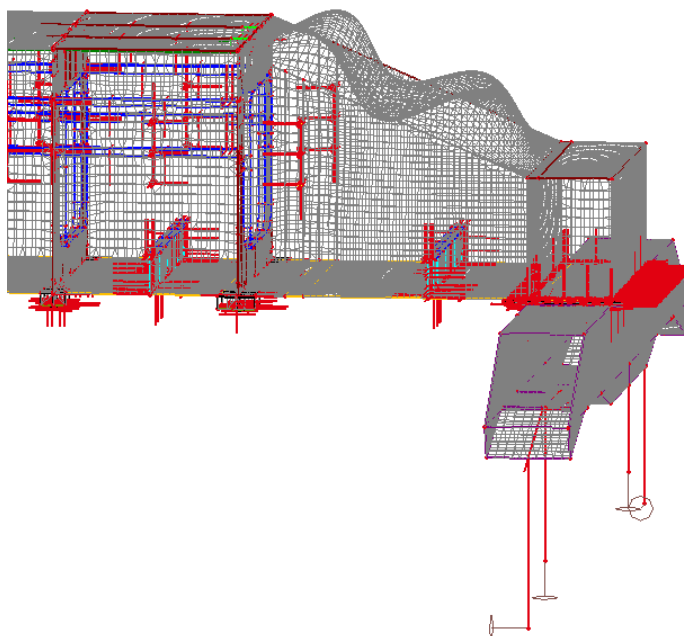
Obr. 225: Devátý stabilitní tvar – deformace horní pásnice ve směru osy z

Ekvivalentní geometrická imperfekce je stanovena pro rozměry boulicího subpanelu tlačené horní pásnice:

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{492}{200}; \frac{795}{200}\right) = \min(2,46; 3,98) = 2,46 \text{ mm}$$

Tento tvar je vyhodnocený jako kritický pro konstrukci.

Následující stabilitní tvary se zvětšujícím se násobitelem zatížení se pohybují v oblasti tlačené horní pásnice. V některých stabilitních tvarech stanovených pomocí software Scia Engineer (celkem 25) dochází k vybočení výztuhy případně ke zkroucení výztuhy z důvodu vyboulení tlačného panelu, o ekvivalentní deformaci imperfektního tvaru však rozhoduje subpanel.

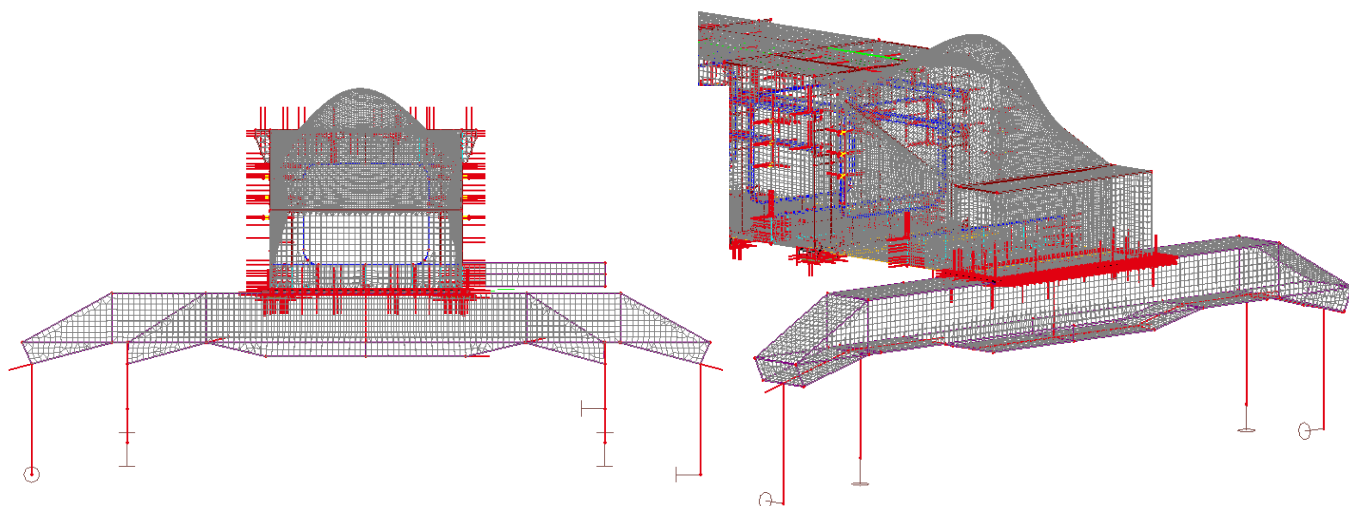


Obr. 226: Dvacátý druhý stabilitní tvar konstrukce s kritickým násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 8,01$

8.5.2 Stabilitní tvary kombinace pro maximální ohybové momenty M_z a M_y

První stabilitní tvar konstrukce pro kombinaci zahrnující zatížení, které na konstrukci vyvoluje maximální ohybový moment kolem osy y i kolem osy z , je skoro totožný s prvním stabilitním tvarem pro kombinaci vyvolující maximální smykovou sílu ve směru osy z . Dochází k vyboulení stěn průřezu a horní tlačené pásnice. Kritický násobitel nabývá hodnoty $\alpha_{cr} = 3,10$. Rozhodující boulicí panel je část horní pásnice, která má rozměry 2 412 x 2 553 mm. Hodnota ekvivalentní geometrické imperfekce:

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{2\,553}{200}; \frac{2\,412}{200}\right) = \min(12,8; 12,06) = 12,06 \text{ mm}$$



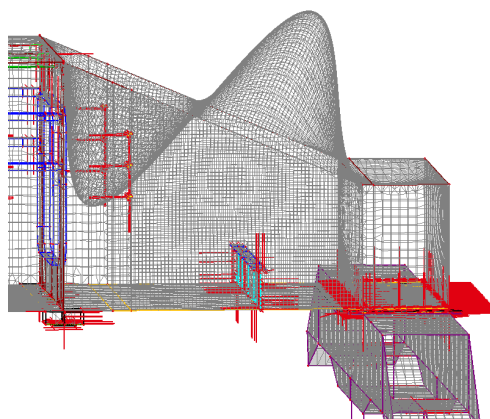
Obr. 227: První stabilitní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z

V druhém stabilitním tvaru dochází k vyboulení stěny současně s částí horní a dolní pásnice konstrukce s kritickým násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 3,96$. Tvar boulení odpovídá analytickému stanovení lokálních boulicích ploch pro zatížení ohybovým momentem kolem osy z v kombinaci s lokálním zatížením od závěsu. Ekvivalentní geometrická imperfekce je stanovena pro rozměry boulicího panelu stěny konstrukce (velikost vyboulené plochy je stanovena odhadem):

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{2\,041}{200}; \frac{1\,446}{200}\right) = \min(10,21; 7,23) = 7,23 \text{ mm}$$

Oba dva stabilitní tvary jsou zvoleny pro posudek napjatosti v konstrukci.

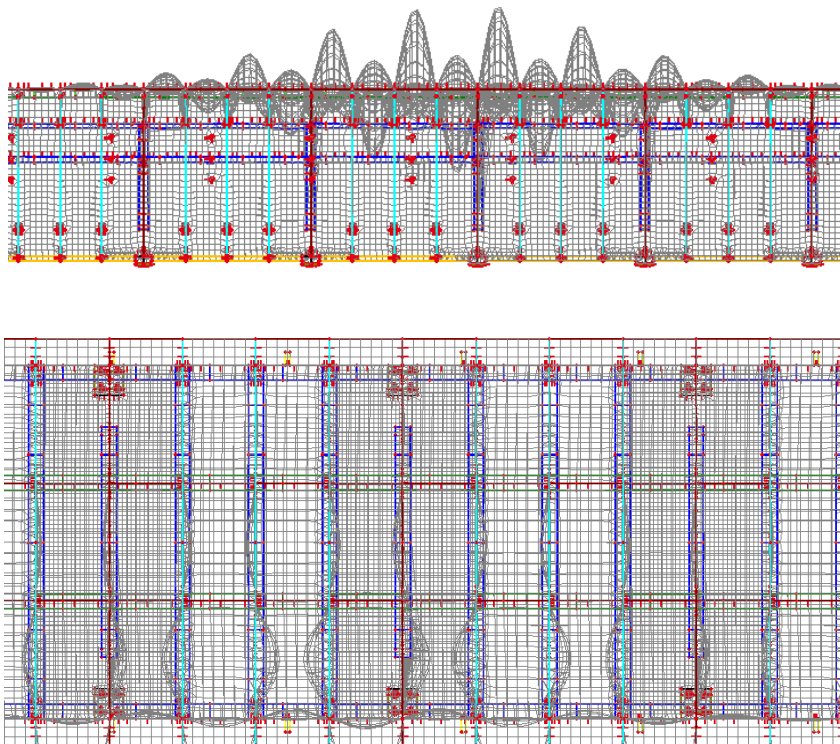
U následných stabilitních tvarů se mění počet půlvln vyboulení subpanelů a střídavě se mění poloha levého a pravého náběhu.



Obr. 228: Čtvrtý stabilní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z
 $\alpha_{cr} = 4,56$

Lokální vyboulení subpanelů tlačného horního pásu nosníku nastává v desátém stabilním tvaru s kritickým násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 7,18$. Kromě vybočení subpanelů dochází k vyboulení stojiny příčné výztuhy. Rozhodující velikost ekvivalentní geometrické imperfekce však určuje právě vyboulený subpanel horního pásu s rozměry 492 x 795 mm:

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{492}{200}; \frac{795}{200}\right) = \min(2,46; 3,98) = 2,46 \text{ mm}$$



Obr. 229: Desátý stabilní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z
 (nahore boční pohled, dole půdorys) $\alpha_{cr} = 7,18$

Další stabilitní tvary znázorňují vyboulení horní tlačené pásnice nebo krajního průřezu v místě náběhu.

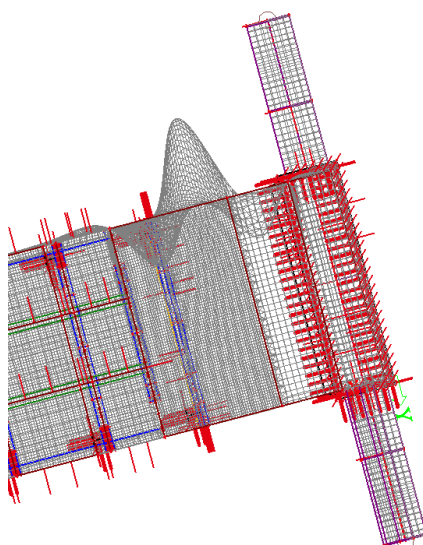
8.5.3 Stabilitní tvary kombinace pro maximální smykovou sílu V_y

V případě kombinace pro maximální posouvající sílu ve směru osy y byly tvary vyboulení stanoveny ve velmi podobných tvarech jako u předchozích kombinací. Pro analýzu napjatosti konstrukce byl vybrán tvar první s kritickým násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 3,05$ (případ vyboulení totožný jako pro první kombinaci vyvolující maximální smykovou sílu V_z), druhý stabilitní tvar s násobitelem $\alpha_{cr} = 4,41$ a jedenáctý kdy dochází k lokálnímu boulení horní tlačené pásnice, pro který nabývá násobitel hodnoty $\alpha_{cr} = 7,18$.

8.5.4 Stabilitní tvary kombinace pro maximální normálovou sílu N

První stabilitní tvary odpovídají tvarům předchozích kombinací, v prvním tvaru boulí horní tlačení pás současně se stěnami, ve druhém dochází k vyboulení stěny průřezu v místě levého vahadla. Pro změnu se pro napjatosti analýzu zvolí tvar třetí, kdy dochází k vyboulení stěny vymezené příčnými výztuhami, i za výztuhami je stěna ovlivněna boulením. Rozměry pro ekvivalentní geometrickou imperfekci definují rozměry stěny panelu:

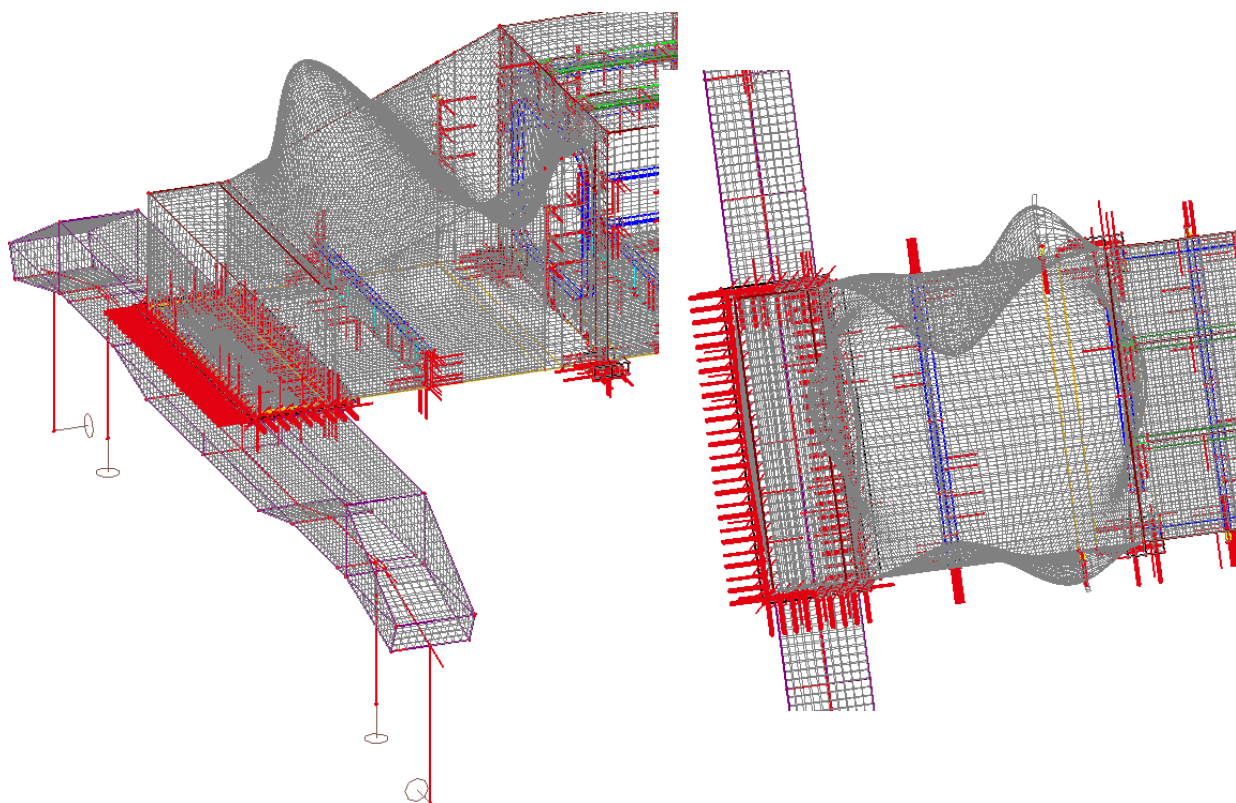
$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{1\,500}{200}; \frac{1\,446}{200}\right) = \min(7,5; 7,23) = 7,23 \text{ mm}$$



Obr. 230: Třetí stabilitní tvar - kombinace pro normálovou sílu N

$$\alpha_{cr} = 4,36$$

Dalším tvarem zvoleným pro napjatostní analýzu je tvar čtvrtý, který zobrazuje složitější vyboulení horní tlačené pásnice průřezu společně s horní částí stěny. Vyboulení je zapříčiněno kombinací namáhání normálovým napětím od ohybového momentu kolem osy y i kolem osy z.



Obr. 231: Čtvrtý stabilitní tvar - kombinace pro normálovou sílu N

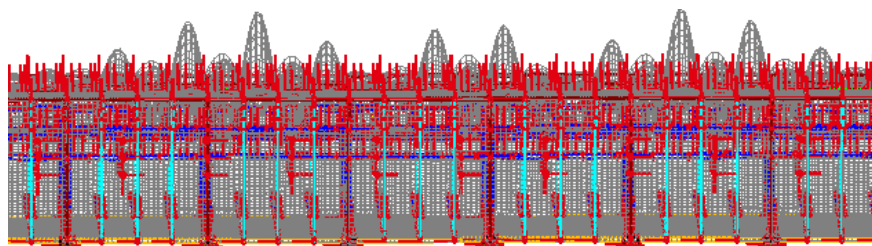
$$\alpha_{cr} = 4,71$$

Hodnota ekvivalentní geometrické imperfekce je stanovena pro rozhodující subpanel horního pásu v místě náběhu:

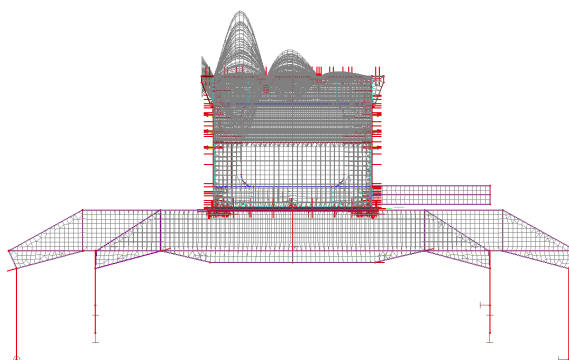
$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{2\,553}{200}; \frac{2\,412}{200}\right) = \min(12,8; 12,06) = 12,06 \text{ mm}$$

S ohledem na stanovení napjatosti s vyboulením horní tlačené pásnice lokálně je zvolen stabilitní tvar třináctý se násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 7,49$. Tvar vykazuje lokální boulení ve větším rozsahu plochy horního pásu. Rozhoduje subpanel pásu s lokálním vyboulením:

$$e_{om} = \min\left(\frac{a}{200}; \frac{b}{200}\right) = \min\left(\frac{492}{200}; \frac{795}{200}\right) = \min(2,46; 3,98) = 2,46 \text{ mm}$$



Obr. 232: Třináctý stabilní tvar - pohled



Obr. 233: Třináctý stabilní tvar - kombinace pro normálovou sílu N

$$\alpha_{cr} = 7,49$$

Veškeré stabilní stavy popsány v této kapitole byly aplikovány do software Scia Engineer, kde byla provedena geometricky nelineární analýza s uvažováním počáteční imperfektní konstrukce a byly zjištěny hodnoty srovnávacích napětí pro jednotlivé typy statických výpočtu a stabilních tvarů. Výsledky a porovnání nárůstů napětí je uvedeno a srovnáno v následující kapitole.

8.6 Geometricky nelineární analýza konstrukce (GNIA)

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty napětí včetně jednotlivých posudků pružné únosnosti stěny v boulení stanovené za použití software Scia Engineer, kdy je využit geometricky nelineární výpočet pro konstrukci s počáteční imperfekcí odpovídající stabilnímu tvaru konstrukce odpovídajícímu příslušným řešeným kombinacím.

8.6.1 Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální smykovou sílu V_z

Pro tuto kombinaci byly vyhodnoceny tvary jedna, dva a devět jako ty nejnebezpečnější. Tvary byly zavedeny jako počáteční imperfekce nosníku a byl proveden geometrický nelineární výpočet konstrukce. Vyhodnocení výsledků není provedeno pro lokální špičky napětí v místě závěsů, pravoúhlého zakřivení prvků (je provedeno pro velikost sítě 100x100, ve zjemněných plochách 25x25), tyto oblasti byly při vyhodnocování vynechány. V tabulkách 16 až 19 jsou uvedeny výsledky nelineárního výpočtu bez i s počáteční imperfekcí. Z hodnot napětí je patrné, že nebezpečný na konstrukci by byl stabilitní tvar č. 2 při kterém dochází k nárůstům srovnávacího napětí na stěnách nosníku a horním pásu. Nárůst není nijak razantní, konstrukce vyhovuje plasticitní podmínce $\sigma_E \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$.

Konstrukční část	Nelineární geometrická statická analýza		
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]	Únosnost [MPa]
Horní pás tl. 16 mm	148,7	132,1	308,70
Dolní pás tl. 16 mm	267,7	259,1	308,70
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	147,8	308,70
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	57,7	56,4	308,70
Podélné výztuhy horní pásnice	70,6	75,7	308,70
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,6	3,9	308,70
Příčná výztuha	151,1	220,5	308,70
Stěny nosníku tl. 12 mm	233,7	246,7	308,70

Tab. 16: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	1. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	148,7	132,1	308,70	48%
Dolní pás tl. 16 mm	267,7	250,3	308,70	87%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	147,8	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	57,7	56,4	308,70	19%
Podélné výztuhy horní pásnice	70,6	75,7	308,70	25%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,6	3,9	308,70	1%
Příčná výztuha	148,3	220,5	308,70	71%
Stěny nosníku tl. 12 mm	233,7	246,7	308,70	80%

Tab. 17: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (1. stabilitní tvar)

Při počáteční imperfekci odpovídající prvnímu stabilitnímu tvaru dochází ke změně napjatosti při vnitřním povrchu dolního pásu a k poklesu napětí příčné výztuhy na vnějším povrchu skořepiny. V případě počáteční imperfekce ve tvaru druhého stabilitního vyboulení stěny nosníku narůstá napětí na stěnách nosníku a to jak při vnějším tak i vnitřním povrchu o cca 0,5%. Z napjatosti vyplývá, že kritičtější tvary pro konstrukci budou takové, kdy dochází k deformaci stěny nosníku oproti pásnicím v krajní oblasti nosníku.

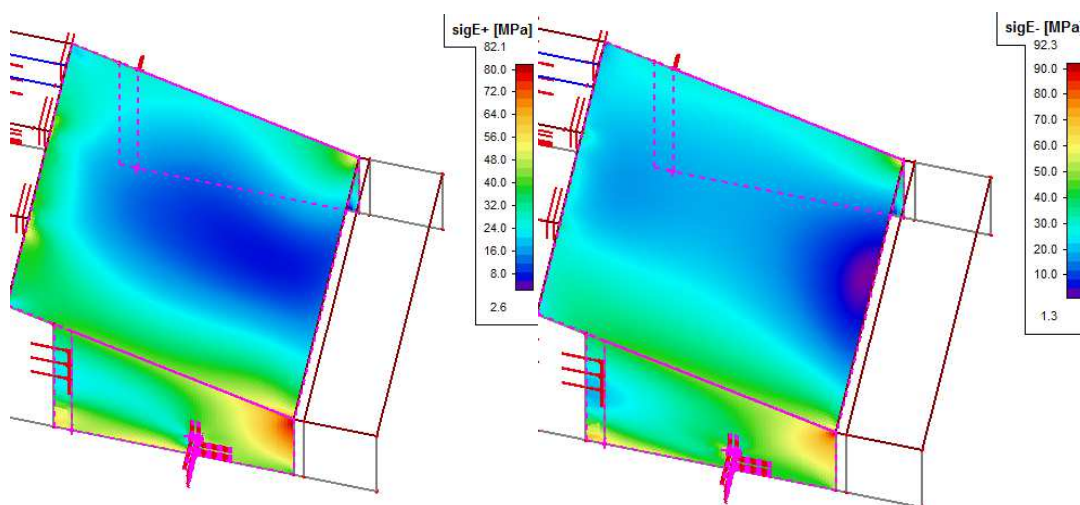
Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	2. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	148,7	132,6	308,70	48%
Dolní pás tl. 16 mm	267,7	250,3	308,70	87%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	147,9	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	57,7	56,4	308,70	19%
Podélné výztuhy horní pásnice	70,6	75,5	308,70	25%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,6	3,9	308,70	1%
Příčná výztuha	151,2	220,5	308,70	71%
Stěny nosníku tl. 12 mm	234,7	248,3	308,70	80%

Tab. 18: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (2. stabilitní tvar)

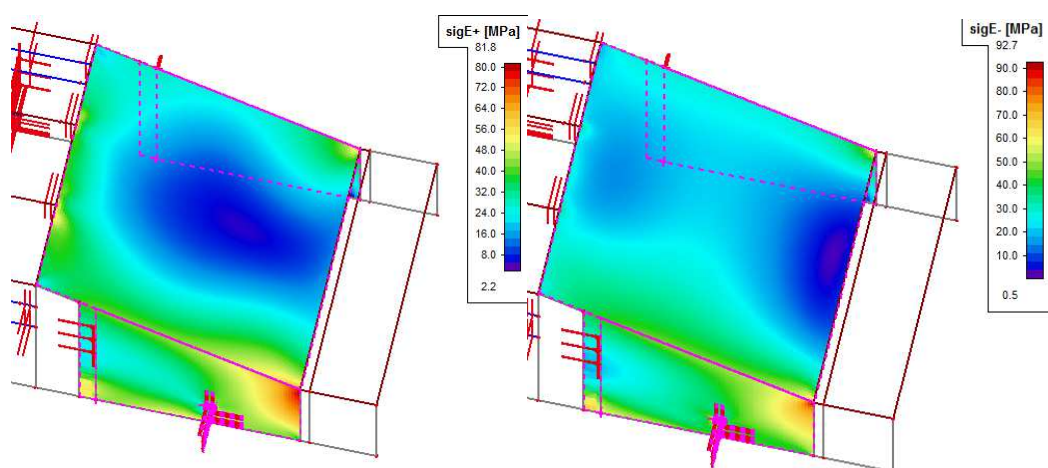
Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	9. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	148,7	132,1	308,70	48%
Dolní pás tl. 16 mm	267,7	250,3	308,70	87%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	147,8	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	57,7	56,4	308,70	19%
Podélné výztuhy horní pásnice	70,6	75,7	308,70	25%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,6	3,9	308,70	1%
Příčná výztuha	150,5	220,5	308,70	71%
Stěny nosníku tl. 12 mm	233,7	246,7	308,70	80%

Tab. 19: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (9. stabilitní tvar)

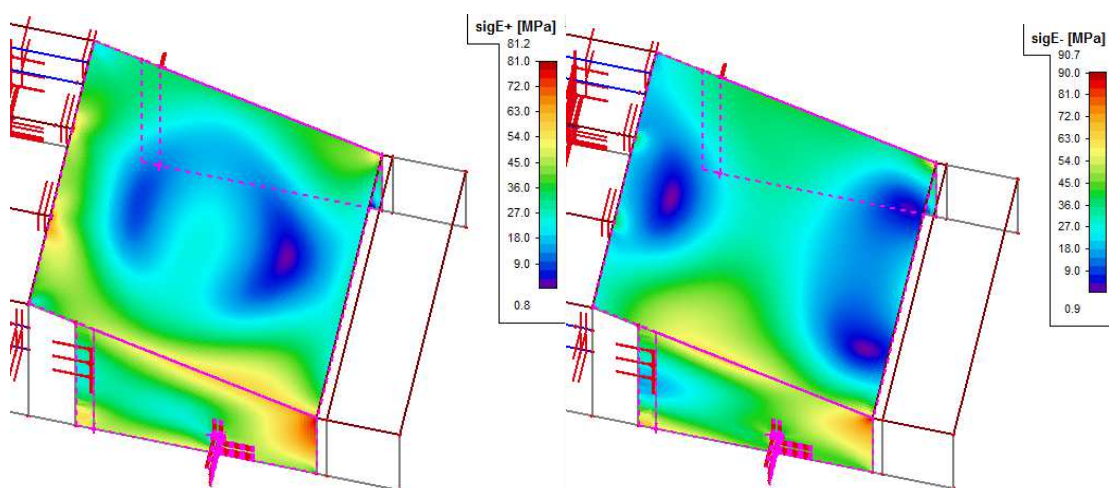
Následující grafické znázornění průběhů srovnávacího napětí zobrazuje i lokální špičky napětí, které nejsou zohledněny v tabulkách uvedených výše, a je stanoveno pro zjemněnou síť 25x25 mm. Na obrázku č. 229 až 231 jsou zobrazeny průběhy srovnávacího napětí pro oblast v místě vahadla s příčnou podporou, tedy v místě kde dochází k prvnímu stabilitnímu vyboulení horní pásnice. Obrázky č. 234 až 236 demonstrují průběhy srovnávacího napětí v oblasti levého vahadla, tedy v místě vyboulení stěny v druhém stabilitním tvaru. A zbývající obrázky zobrazují průběh napětí pro poslední zvolený stabilitní tvar uprostřed nosníku.



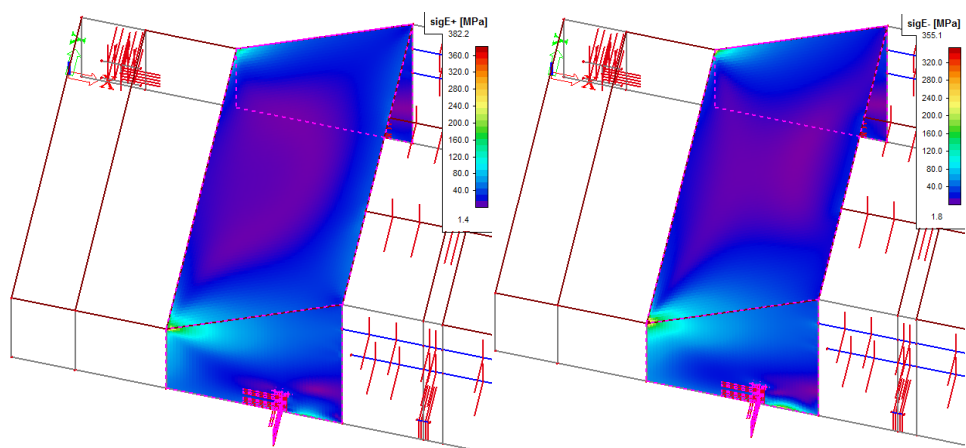
Obr. 234: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet



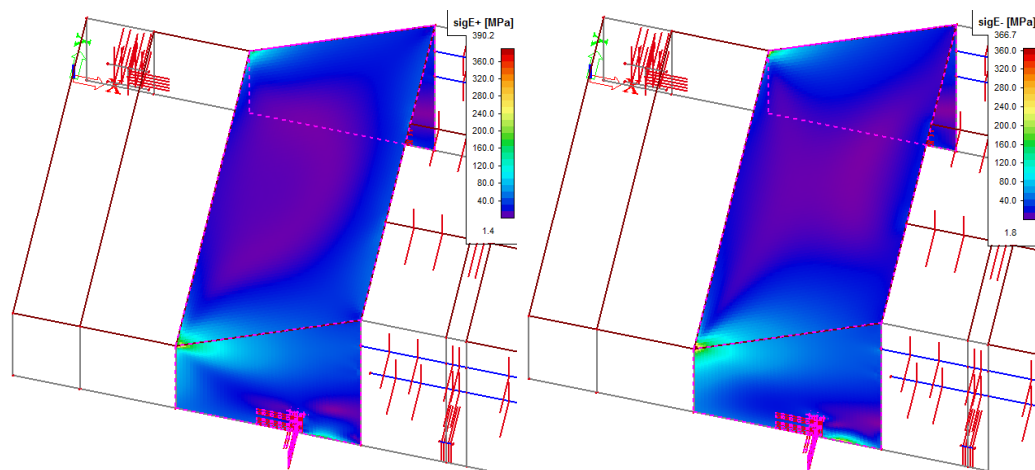
Obr. 235: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



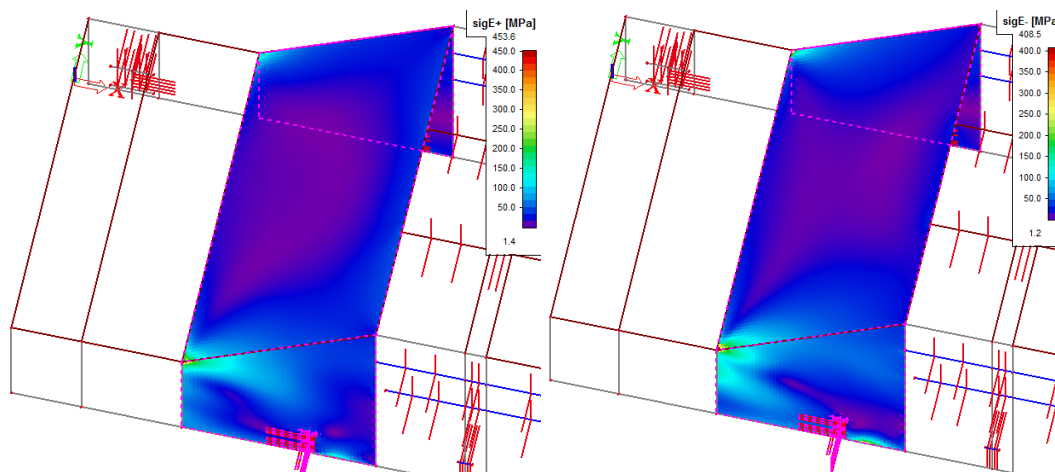
Obr. 236: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – první stabilní tvar



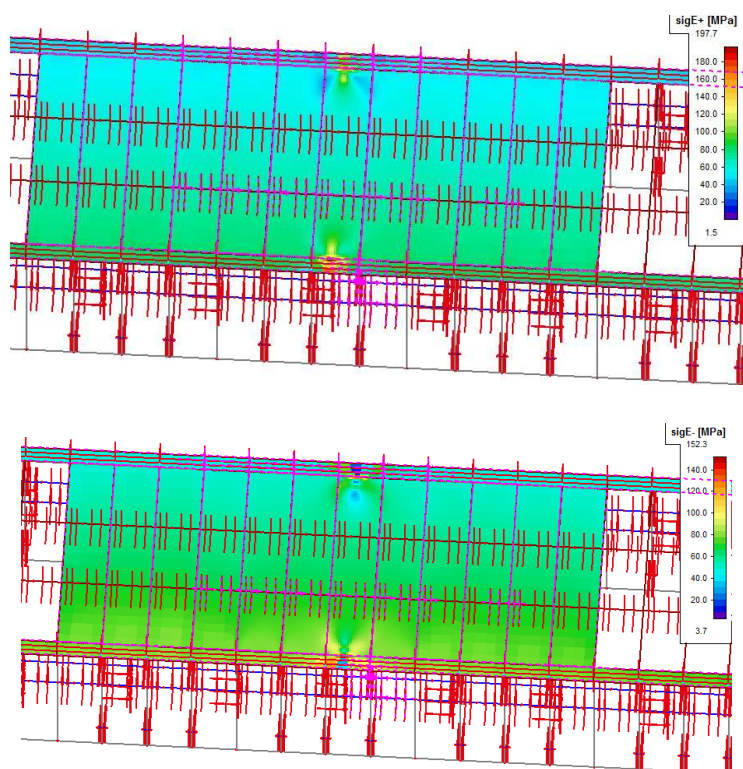
Obr. 237: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet



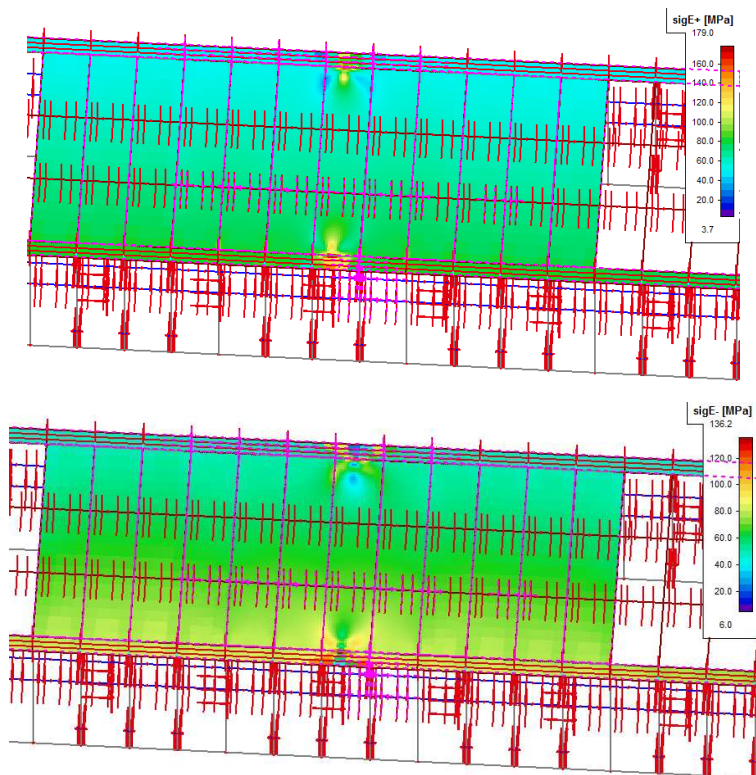
Obr. 238: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



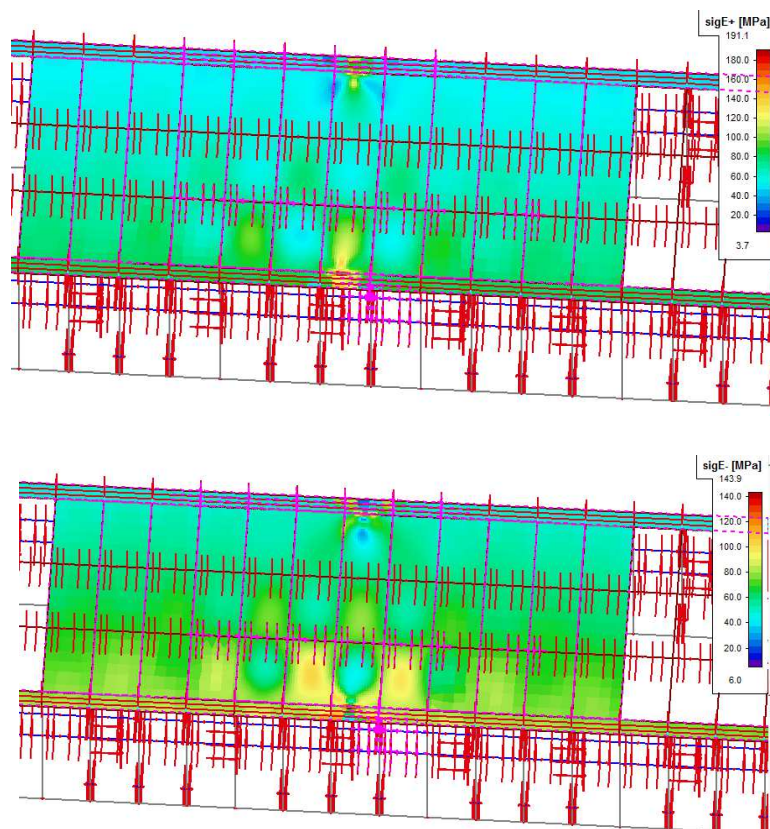
Obr. 239: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – druhý stabilní tvar



Obr. 240: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet



Obr. 241: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



Obr. 242: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – devátý stabilní tvar

Devátý stabilní tvar nezpůsobí znatelně vysoký nárůst napětí na jednotlivých částech nosníku. Z obrázků je patrná změna napjatosti, která nastává již při řešení konstrukce geometricky nelineárním výpočtem bez uvážení imperfekce. Konstrukce na kombinaci způsobující maximální smykovou sílu ve směru osy y **VYHOVUJE**.

8.6.2 Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální ohybový moment M_y a M_z

V případě kombinace pro maximální ohybové momenty v obou směrech byly vybrány pro posudek stabilitní tvary 1, 2 a 10. Pro tuto kombinaci vzniká v horní pásnici menší hodnota napětí než v případě předchozí kombinace.

Konstrukční část	Nelineární geometrická statická analýza		
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]	Únosnost [MPa]
Horní pás tl. 16 mm	136,3	119,9	308,70
Dolní pás tl. 16 mm	265,8	255,5	308,70
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,7	308,70
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	54,8	53,7	308,70
Podélné výztuhy horní pásnice	66,6	72,1	308,70
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,4	3,7	308,70
Příčná výztuha	149,1	221,1	308,70
Stěny nosníku tl. 12 mm	232,1	246,4	308,70

Tab. 20: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	1. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	136,3	119,9	308,70	44%
Dolní pás tl. 16 mm	265,8	255,5	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,7	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	54,8	53,7	308,70	18%
Podélné výztuhy horní pásnice	66,6	72,1	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,4	3,7	308,70	1%
Příčná výztuha	146,6	221,1	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	232,1	246,4	308,70	80%

Tab. 21: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (1. stabilitní tvar)

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	2. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	136,3	120,3	308,70	44%
Dolní pás tl. 16 mm	265,8	255,4	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,7	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	54,8	53,7	308,70	18%
Podélné výztuhy horní pásnice	66,6	71,9	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,4	3,7	308,70	1%
Příčná výztuha	149,1	221,1	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	233,0	247,7	308,70	80%

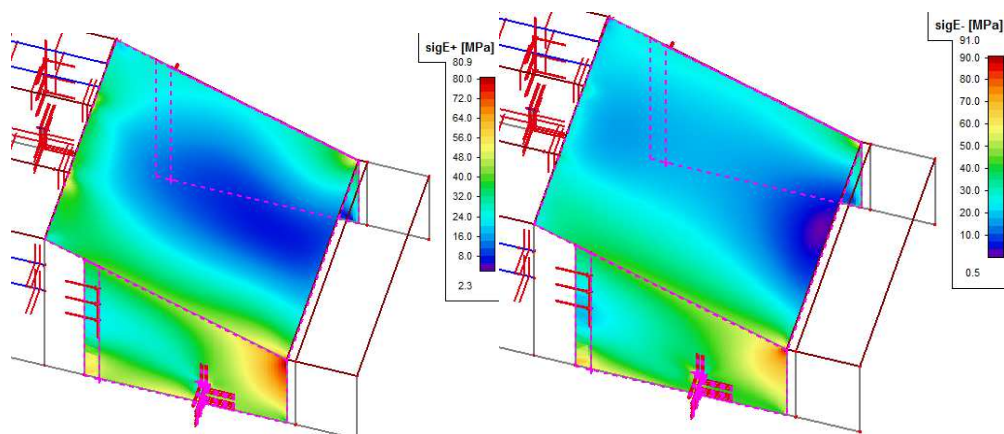
Tab. 22: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (2. stabilitní tvar)

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	10. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	136,3	120,0	308,70	44%
Dolní pás tl. 16 mm	265,8	255,5	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,7	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	54,8	53,7	308,70	18%
Podélné výztuhy horní pásnice	66,6	72,1	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,4	3,7	308,70	1%
Příčná výztuha	149,7	221,1	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	232,1	246,3	308,70	80%

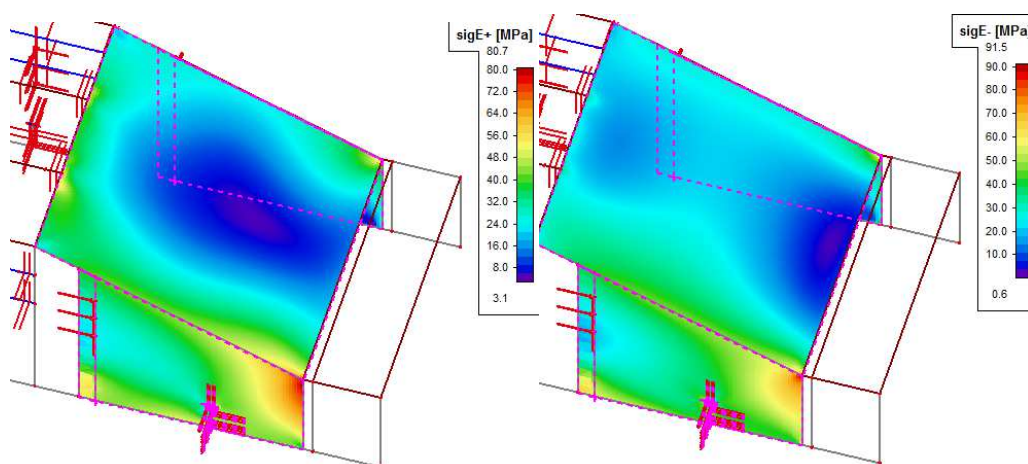
Tab. 23: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (10. stabilitní tvar)

Pro danou kombinaci je dle výsledků uvedených v tabulkách patrné, že k většímu ovlivnění napjatosti dochází při počáteční imperfekci, která postihuje stěnu nosníku. Dochází ke změně napjatosti stěny nosníku a k mírnému poklesu napjatosti na podélných výztuhách profilu ½ IPE200 horní pásnice. Konstrukce z ohledem na posouzení napjatostí pomocí analýzy s použitím konečných prvků **VYHOVUJE** na tuto kombinaci.

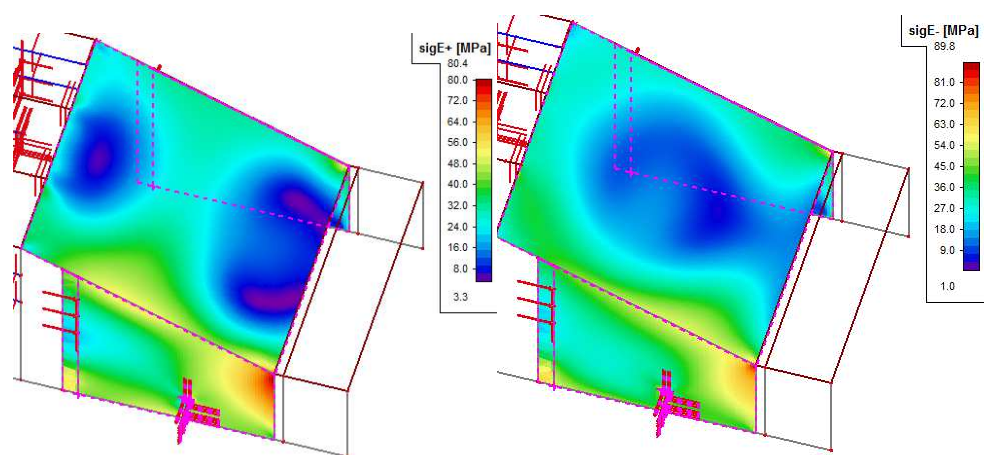
Grafické znázornění průběhů srovnávacího napětí zobrazuje i lokální špičky napětí, které nejsou zohledněny v tabulkách uvedených výše, a je provedeno pro síť 25x25 mm. Na obrázku 243 až 245 jsou zobrazeny průběhy srovnávacího napětí pro oblast v místě vahadla s příčnou podporou, tedy v místě kde dochází k prvnímu stabilitnímu vyboulení horní pásnice. Obrázky 246 až 248 demonstrují průběhy srovnávacího napětí v oblasti levého vahadla, tedy v místě vyboulení stěny v druhém stabilitním tvaru. A zbývající obrázky zobrazují průběh napětí pro poslední zvolený stabilitní tvar uprostřed nosníku.



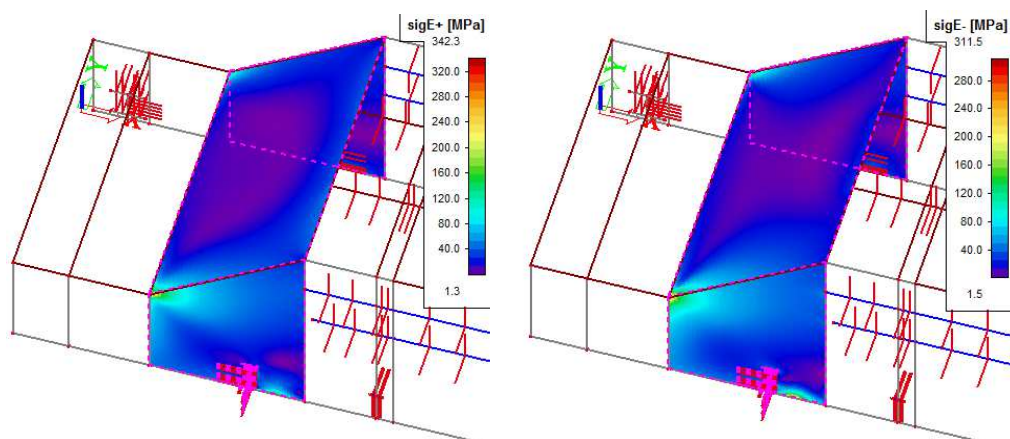
Obr. 243: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet



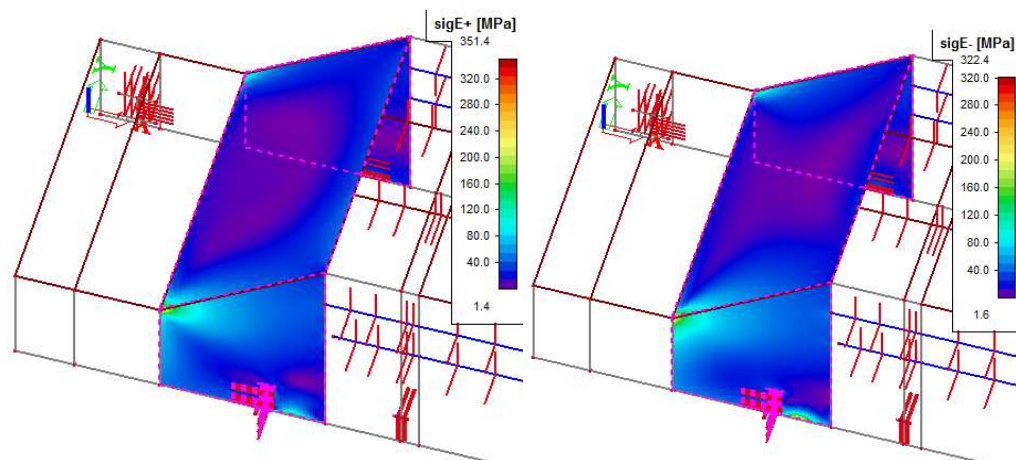
Obr. 244: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



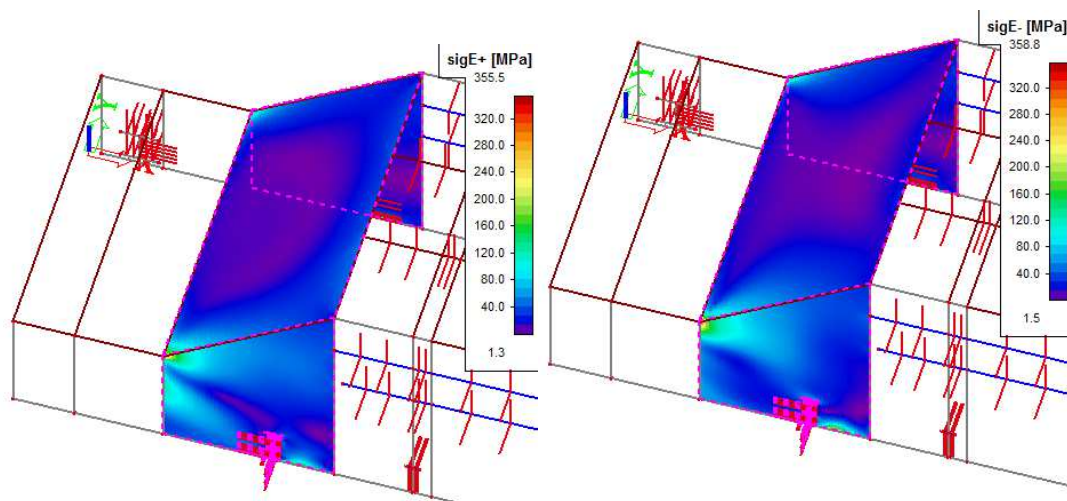
Obr. 245: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfkcí – první stabilní tvar



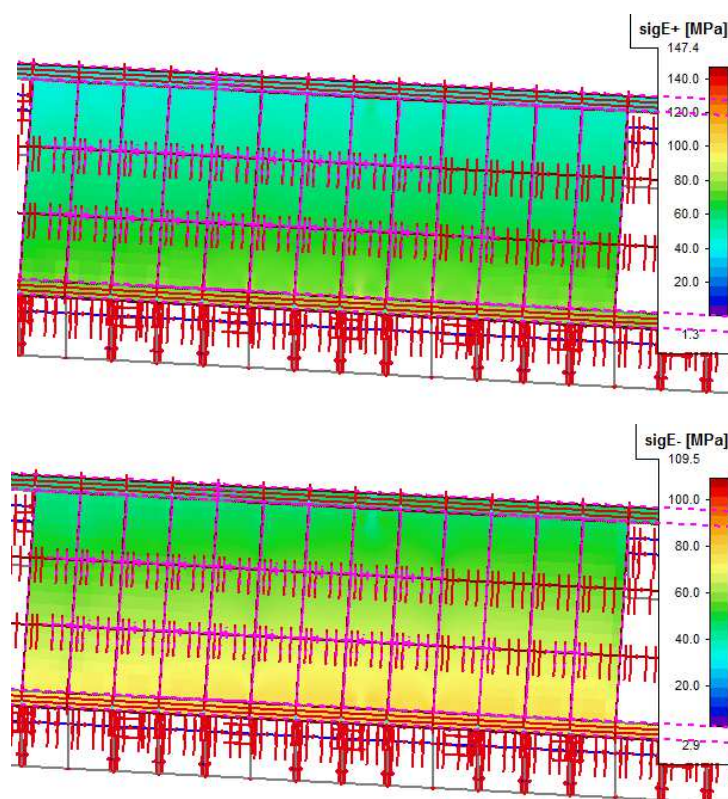
Obr. 246: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet



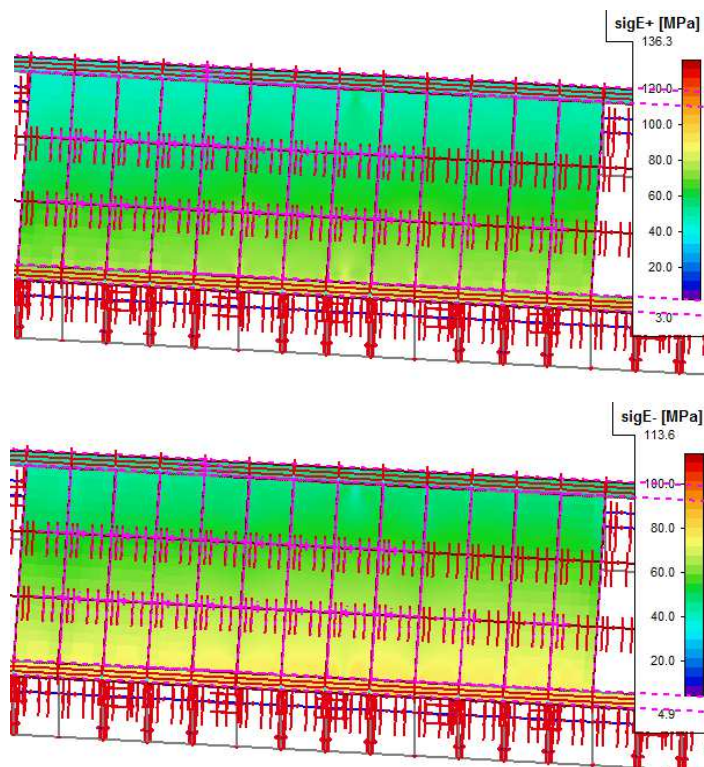
Obr. 247: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



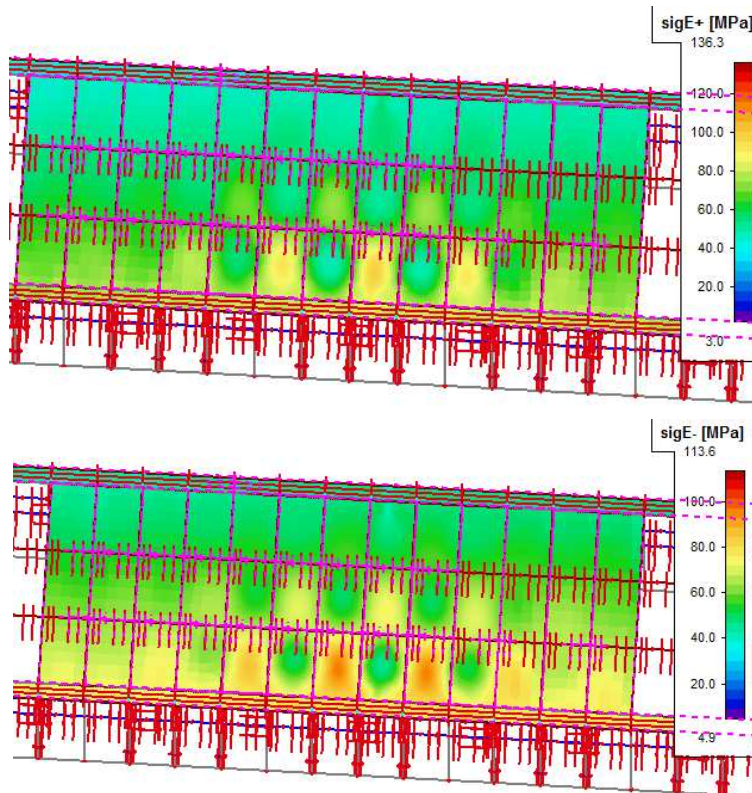
Obr. 248: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – druhý stabilní tvar



Obr. 249: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet



Obr. 250: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



Obr. 251: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – desátý stabilizní tvar

8.6.3 Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální smykovou sílu V_y

Pro tuto kombinaci byly zvoleny imperfektní tvary odpovídající stavu 1, 2 a 11, které jsou velmi podobné tvarům při namáhání zatížením způsobujícím maximální posouvající sílu ve směru osy z . Opět dochází k mírnému nárůstu napětí v případě druhého stabilitního imperfektního tvaru s vyboulenou stěnou v místě uložení konstrukce. Konstrukce na tuto kombinaci jistě **VYHOVUJE**.

8.6.4 Geometrická nelineární statická analýza kombinace pro maximální normálovou sílu N

V případě posudku namáhání, které způsobuje kombinace maximální normálové síly, byly zvoleny jiné tvary vyboulení, než pro kombinace předchozí viz kapitola 7.6.2

Konstrukční část	Nelineární geometrická statická analýza		
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]	Únosnost [MPa]
Horní pás tl. 16 mm	133,3	117,3	308,70
Dolní pás tl. 16 mm	265,4	254,8	308,70
Čelo nosíku tl. 16 mm	156,5	146,4	308,70
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53	51,8	308,70
Podélné výztuhy horní pásnice	64,2	71,4	308,70
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,3	3,6	308,70
Příčná výztuha	143,8	221,3	308,70
Stěny nosíku tl. 12 mm	231,7	246,3	308,70

Tab. 24: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	3. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	133,3	117,4	308,70	45%
Dolní pás tl. 16 mm	265,4	254,8	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,4	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53	51,8	308,70	17%
Podélné výztuhy horní pásnice	64,2	71,4	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,3	3,6	308,70	1%
Příčná výztuha	143,3	221,3	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	231,7	246,3	308,70	81%

Tab. 25: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (3. stabilitní tvar)

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	4. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	133,3	139,2	308,70	45%
Dolní pás tl. 16 mm	265,3	254,4	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,7	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53	51,8	308,70	17%
Podélné výztuhy horní pásnice	63,9	71	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,3	3,6	308,70	1%
Příčná výztuha	143,9	221,3	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	233,7	248,7	308,70	81%

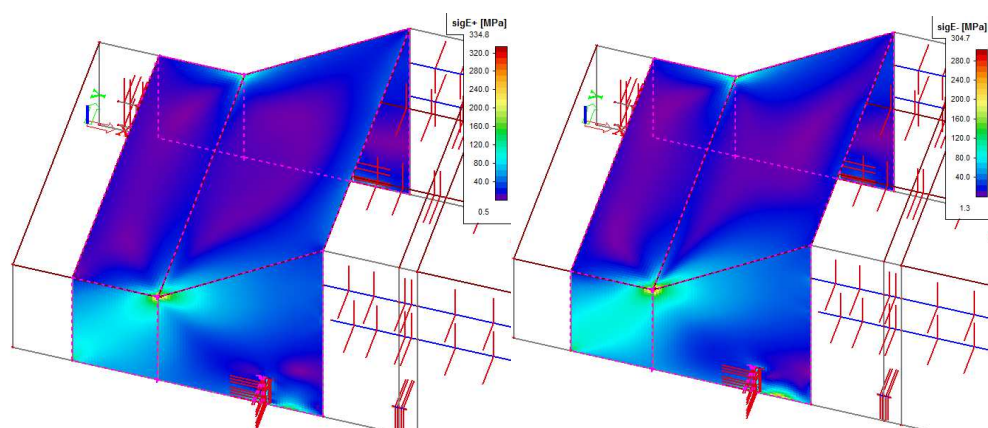
Tab. 26: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (4. stabilitní tvar)

Konstrukční část	Geometricky nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí			
	13. Stabilitní tvar		Únosnost [MPa]	Využití
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]		
Horní pás tl. 16 mm	139,3	117,3	308,70	45%
Dolní pás tl. 16 mm	265,4	254,7	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,4	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53	51,8	308,70	17%
Podélné výztuhy horní pásnice	64,2	71,4	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,3	3,6	308,70	1%
Příčná výztuha	143,3	221,3	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	231,7	246,3	308,70	81%

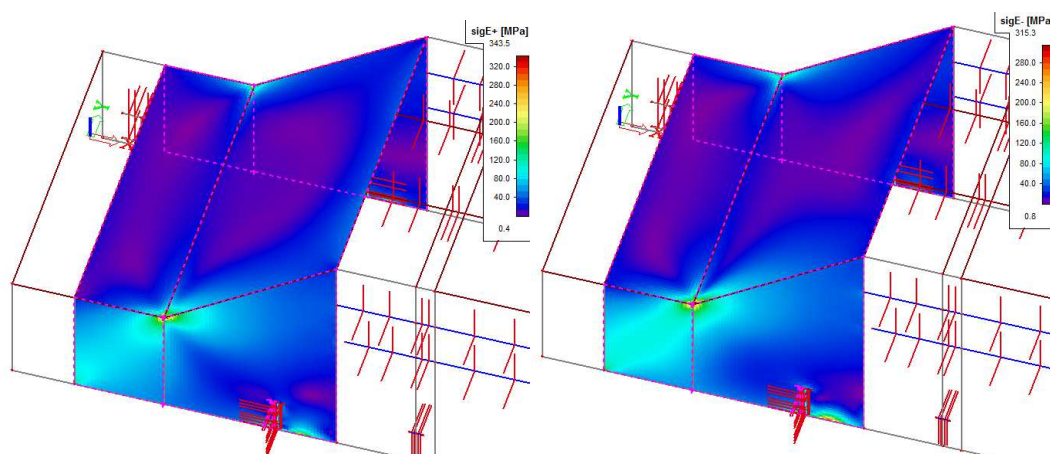
Tab. 27: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (13. stabilitní tvar)

Hodnoty napětí v tabulkách zobrazují, že nebezpečným imperfektním tvarem konstrukce je tvar čtvrtý, který je charakterizován kombinací vyboulení horního pásu s oběma stěnami nosníku v místě náběhu konstrukce. Dochází k nárůstu napětí na vnitřním povrchu skořepiny asi o cca 15 %. Další poklesy a nárůsty napětí nejsou razantního charakteru. Naopak zvolený třináctý tvar napjatost téměř neovlivňuje. Konstrukce **VYHOVUJE** na kombinaci maximální normálové síly.

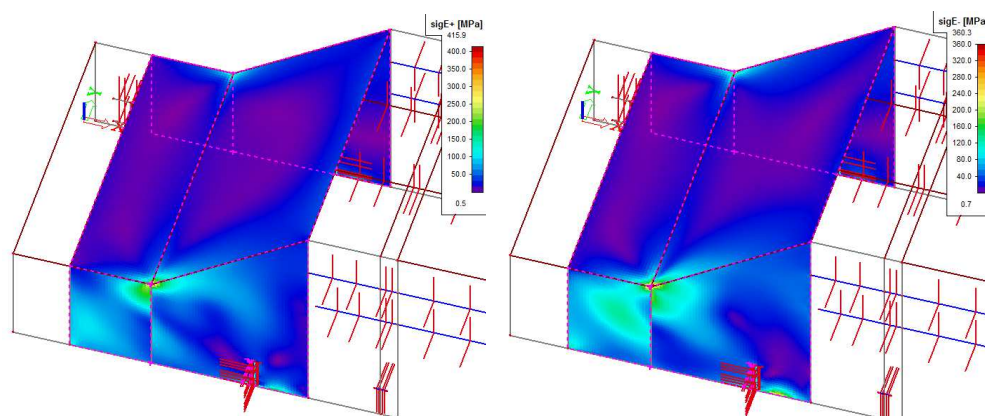
Grafické znázornění průběhů srovnávacího napětí zobrazuje i lokální špičky napětí, které nejsou zohledněny v tabulkách uvedených výše, a je provedeno pro síť 25x25 mm. Na obrázku č. 247 až 249 jsou zobrazeny průběhy srovnávacího napětí pro oblast v místě vahadla s příčnou podporou, tedy v místě kde dochází k třetímu stabilitnímu vyboulení stěny nosníku. Obrázky č. 252 až 254 demonstrují průběhy srovnávacího napětí v oblasti pravého vahadla, tedy v místě vyboulení horní pásnice čtvrtého stabilitního tvaru. A zbývající obrázky zobrazují průběh napětí pro poslední zvolený stabilitní tvar uprostřed nosníku (třináctý stabilitní tvar).



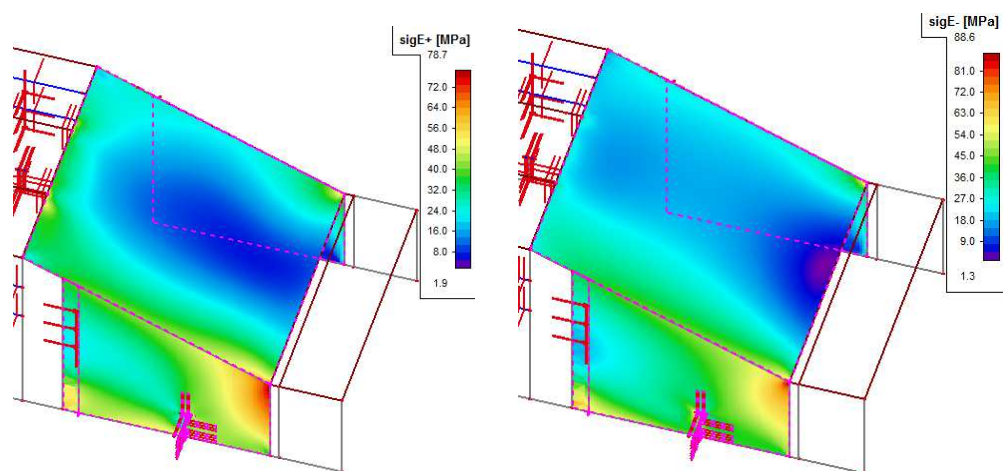
Obr. 252: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet



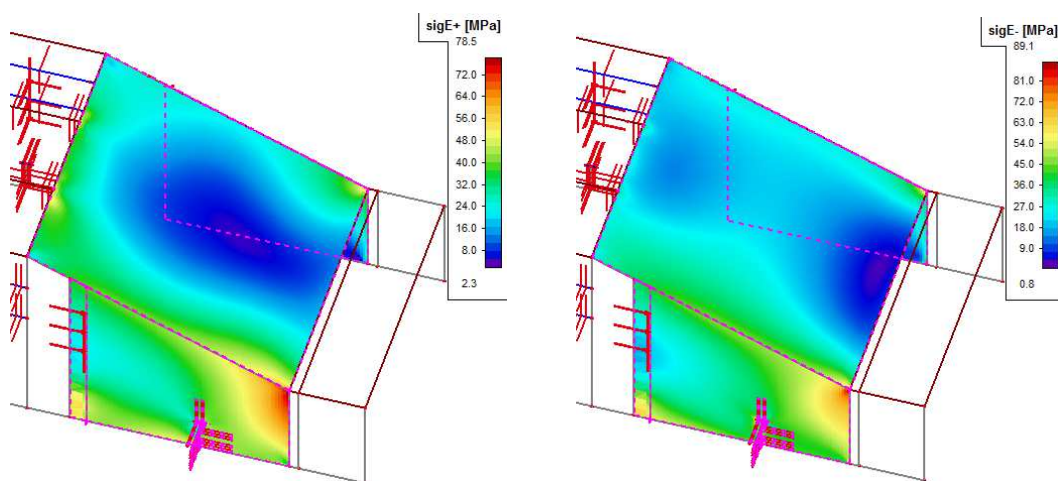
Obr. 253: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



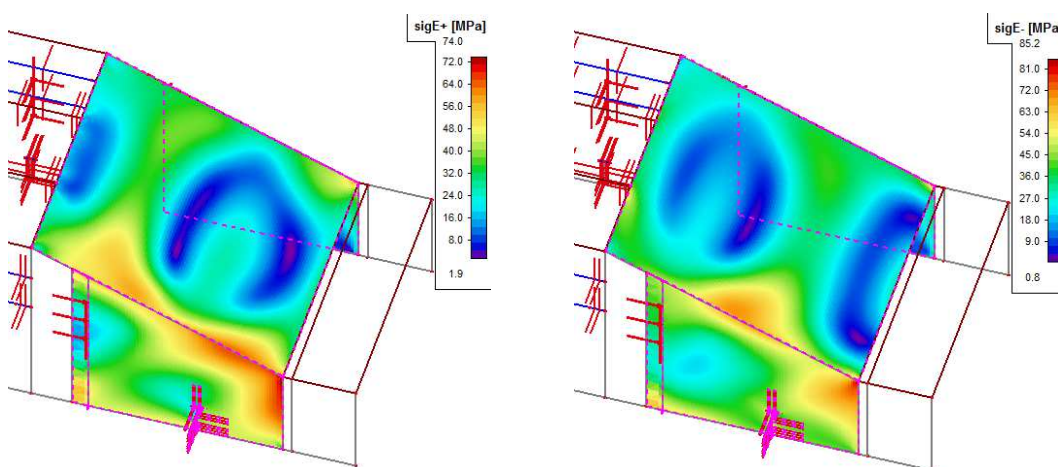
Obr. 254: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – třetí stabilní tvar



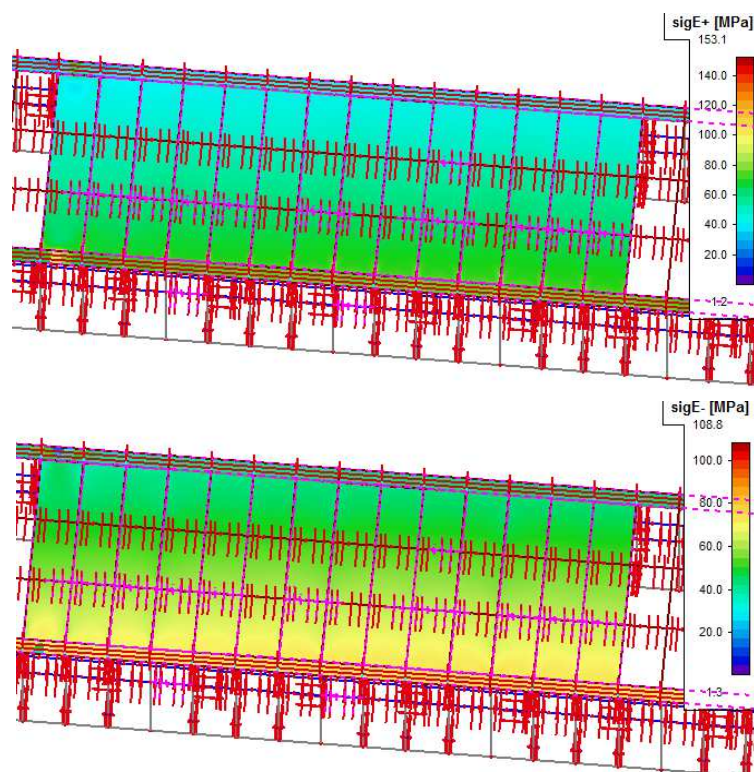
Obr. 255: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet



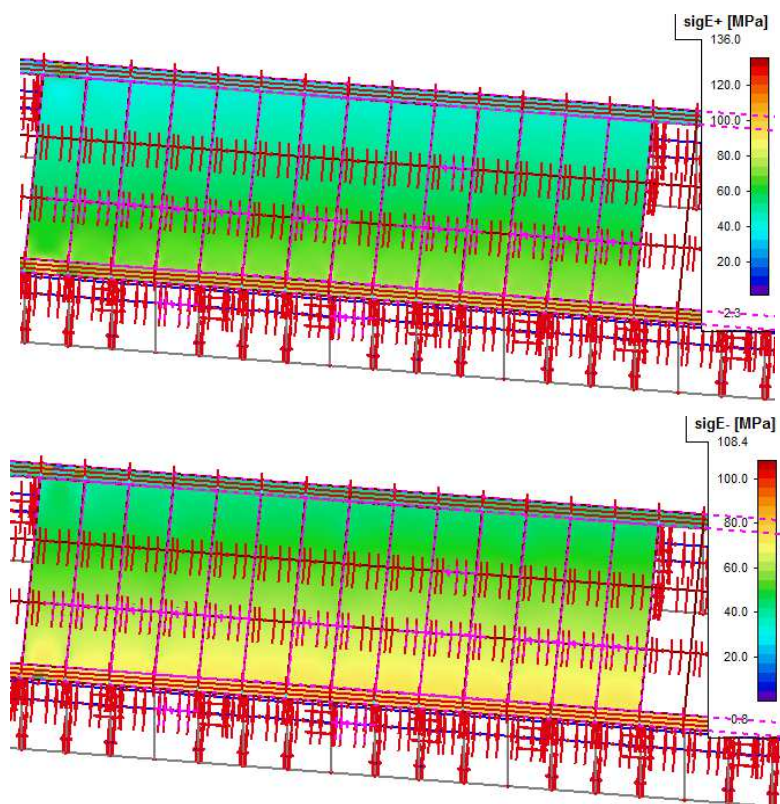
Obr. 256: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



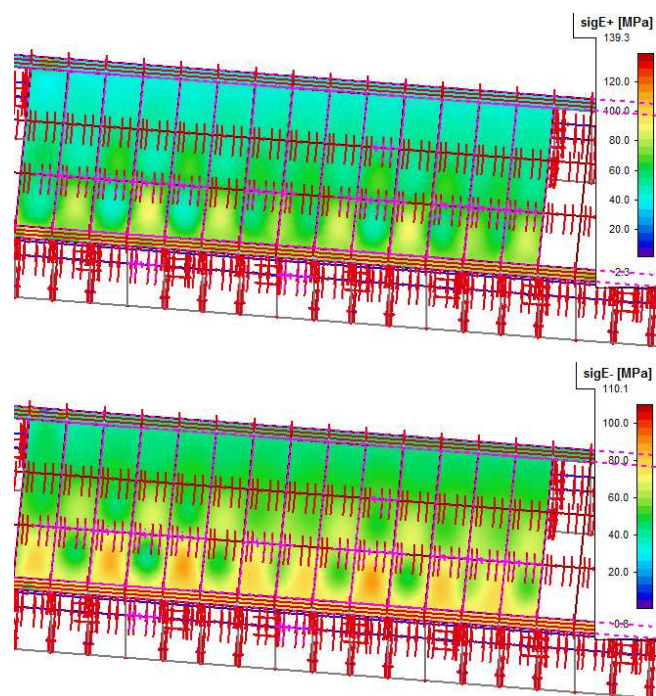
Obr. 257: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – čtvrtý stabilitní tvar



Obr. 258: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet



Obr. 259: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce



Obr. 260: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci ohybové momenty normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – třináctý stabilitní tvar

8.7 Účinky geometrického nelineárního výpočtu

V této kapitole je zobrazen nárůst hodnoty napětí na rozdíl v případě nelineárního výpočtu s ohledem na účinky dle teorie 2. řádu na rozdíl od lineárního výpočtu. Pro porovnání je vybrána kombinace maximální normálové síly.

Konstrukční část	Lineární statická analýza			
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]	Únosnost [MPa]	Využití
Horní pás tl. 16 mm	144,5	115,8	308,70	47%
Dolní pás tl. 16 mm	245,9	225,3	308,70	80%
Čelo nosníku tl. 16 mm	126,5	113,4	308,70	41%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53,1	51,8	308,70	17%
Podélné výztuhy horní pásnice	63,3	69,1	308,70	22%
Vnější stěnové výztuhy tl. 3 mm	2,6	3	308,70	1%
Příčná výztuha	177,8	196,5	308,70	64%
Stěny nosníku tl. 12 mm	200	212,8	308,70	69%

Tab. 28: Srovnávací napětí – lineární statická analýza

Konstrukční část	Nelineární geometrická statická analýza			
	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]	Únosnost [MPa]	Využití
Horní pás tl. 16 mm	133,3	117,3	308,70	43%
Dolní pás tl. 16 mm	265,4	254,8	308,70	86%
Čelo nosníku tl. 16 mm	156,5	146,4	308,70	51%
Stěnové podélné výztuhy tl. 8mm	53	51,8	308,70	17%
Podélné výztuhy horní pásnice	64,2	71,4	308,70	23%
Vnější stěnový výztuhy tl. 3 mm	3,3	3,6	308,70	1%
Příčná výztuha	143,8	221,3	308,70	72%
Stěny nosníku tl. 12 mm	231,7	246,3	308,70	80%

Tab. 29: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce

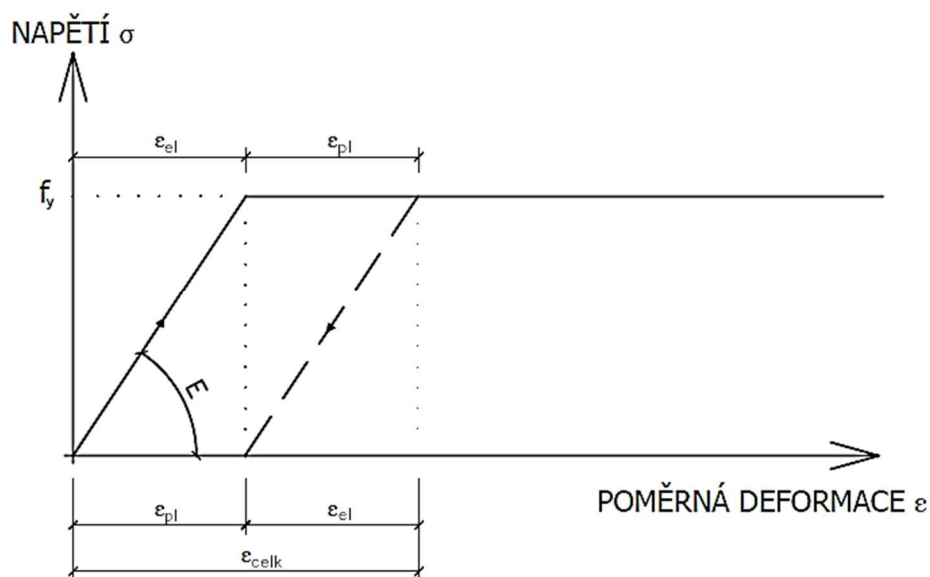
V důsledku zavedení účinků teorie 2. řádu na konstrukci dochází ke značnému přerozdělení napjatosti v jednotlivých částech posuzované konstrukce. V horní pásnici dochází ke snížení napjatosti, naopak v dolní pásnici napětí narůstá. K nárůstu dochází i v místě uložení v případě svislé příčné výztuhy. U podélných výztuh stěn a pásnice nosníku nedochází k výrazné změně napjatosti v důsledku aplikace geometrické nelinearity. U příčných výztuh hodnota napětí poklesla, ale u stěn dochází k nárůstu, jelikož stěny vykazují velkou štíhlost hlavně v místech, které nejsou vyztuženy podélnými výztuhami. V případě zavedení počáteční imperfekce konstrukce ve tvaru stabilitním, již nedochází k výrazné změně hodnot srovnávacího napětí.

Pro posudek se aplikovaly stabilitní tvary s nízkým kritickým násobitelem zatížení, které způsobovaly především vyboulení v oblasti náběhu v blízkosti vahadel konstrukce (v místech velkého působení smykového napětí a lokálního napětí od závěsů konstrukce). Pro případ, že by bylo zapotřebí stabilitu konstrukce vylepšit, by bylo vhodné vyztužit oblast náběhu podélnými stěnovými výztuhami a příčnou výztuhou s otvorem zajišťujícím průlez v konstrukci. Jelikož je výška nosníku malá, příčná výztuha nepripadá v úvahu, ovšem i stěnové výztuhy by snížily možnost vyboulení stěny.

8.8 Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce (GMNIA)

Uvážením pružno-plastického pracovního diagramu se aplikuje do výpočtu konstrukce plastická větev napětí, která omezuje lineární nárůst napětí hodnotou meze kluzu oceli. V software Scia Engineer jsou změněny parametry materiálu použitého v numerickém výpočtu na izotropní pružno-plastický bez zpevnění s hodnotou meze kluzu 355 MPa. Použitý statický software umožňuje stanovení napětí s ohledem na aplikaci plastické větve, v tomto případě se nedosáhne žádné lokální špičky napětí, které by tuto hodnotu překročily. Prakticky se zjišťuje napětí v pružno-plastickém stavu konstrukce s „reálnými“ počátečními imperfekcemi odpovídajícím stanoveným stabilitním tvarům. Pro tuto analýzu byly vybrány stabilitní tvary první s vyboulením horní tlačené pásnice v oblasti náběhu s nejmenší hodnotou kritického násobitele zatížení.

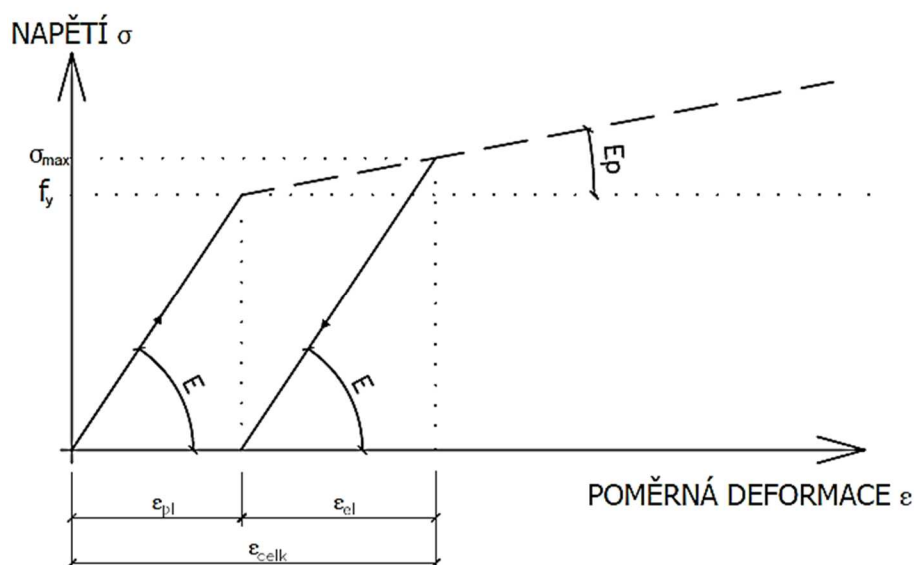
Nejprve je konstrukci nastaven materiál plastický bez zpevnění. Hodnoty povrchových napětí získaných z této analýzy jsou orientační a slouží především k lokalizaci zplastizovaných oblastí na konstrukci nikoliv k samotnému posouzení, jelikož hodnota napětí nepřesáhne hodnotu meze kluzu.



Obr. 261: Bilineární pracovní diagram oceli pružno-plastický bez zpevnění

V případě, že za použití GMNIA, tedy geometricky a materiálově nelineární pružnostní analýzy, kdy se stanovují hodnoty povrchových napětí sloužící k posouzení konstrukce, je vhodné zvolit v software Scia Engineer materiál izotropní pružno-plastický se zpevněním. V daných případech je zvoleno

zpevnění doporučené minimální hodnoty $E_p = 2\,100,0\text{ MPa}$, což představuje 1/100 původní hodnoty modulu pružnosti oceli.

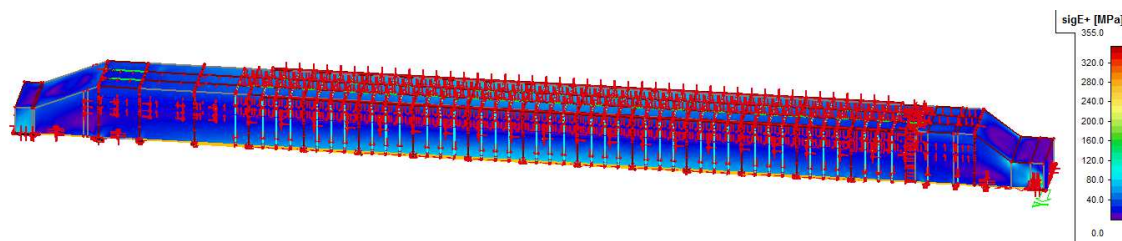


Obr. 262: Bilineární pracovní diagram oceli pružno-plastický s lineárním zpevněním

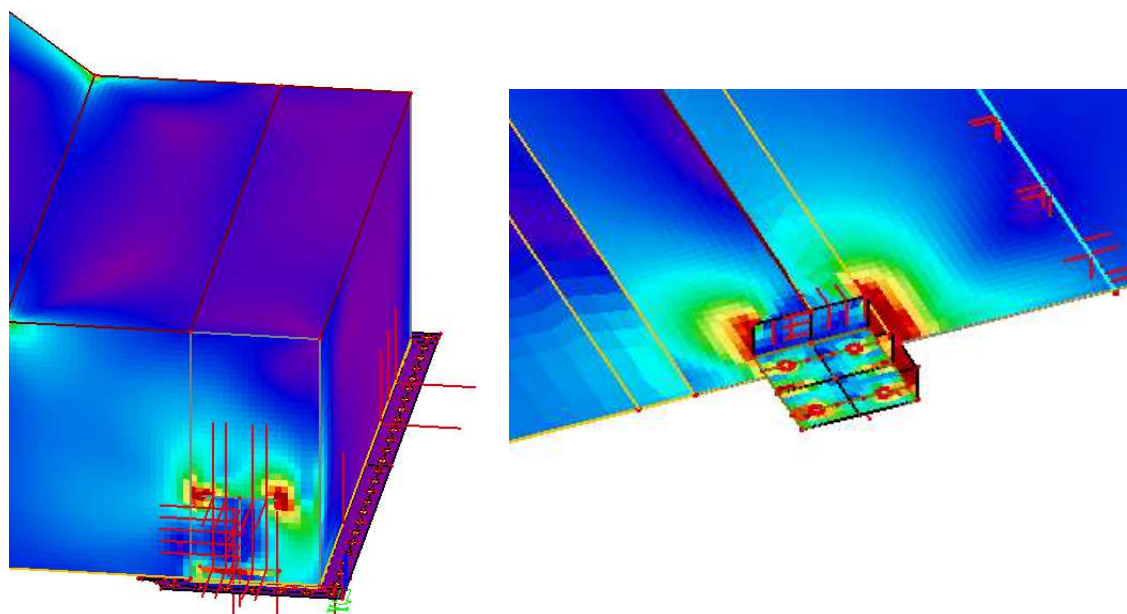
V následující části práce jsou provedeny GMNIA analýzy konstrukce v software Scia Engineer. Nejprve jsou identifikovány plastické oblasti s použitím pracovního diagramu oceli bez zpevnění v plastické části a pro posouzení nárůstu napětí je provedena analýza s materiálem vykazujícím minimální zpevnění na základě podmínky definované v normě ČSN EN 1993-1-5 je konstrukce posouzena. Podmínka stanovuje, že celkové poměrné povrchové přetvoření skořepiny nesmí přesáhnout mezní hodnotu 0,05.

8.8.1 Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální ohybové momenty M_y a M_z

Zplastizování materiálu nastává především v oblasti závěsu konstrukce v místě napojení závěsu na spodní pásnici nosníku a v místech lokálních. V místě zavedení počáteční imperfektní konstrukce (vyboulení horní pásnice v místě náběhu) nedochází ke zplastizování deskostěnových prvků.

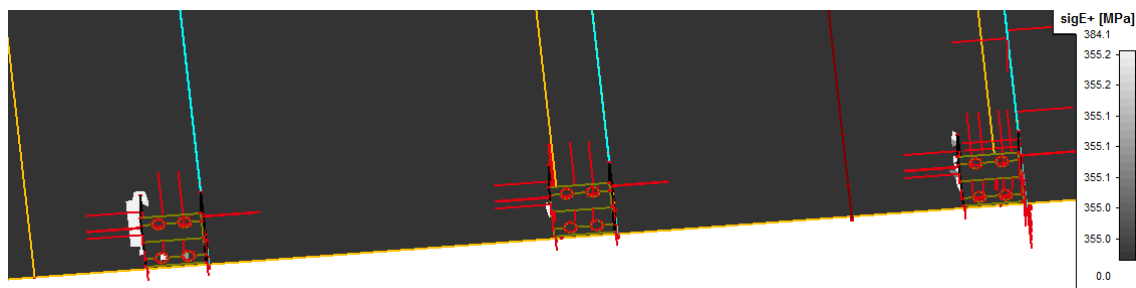


Obr. 263: Průběh napětí vnějšího povrchu skořepin

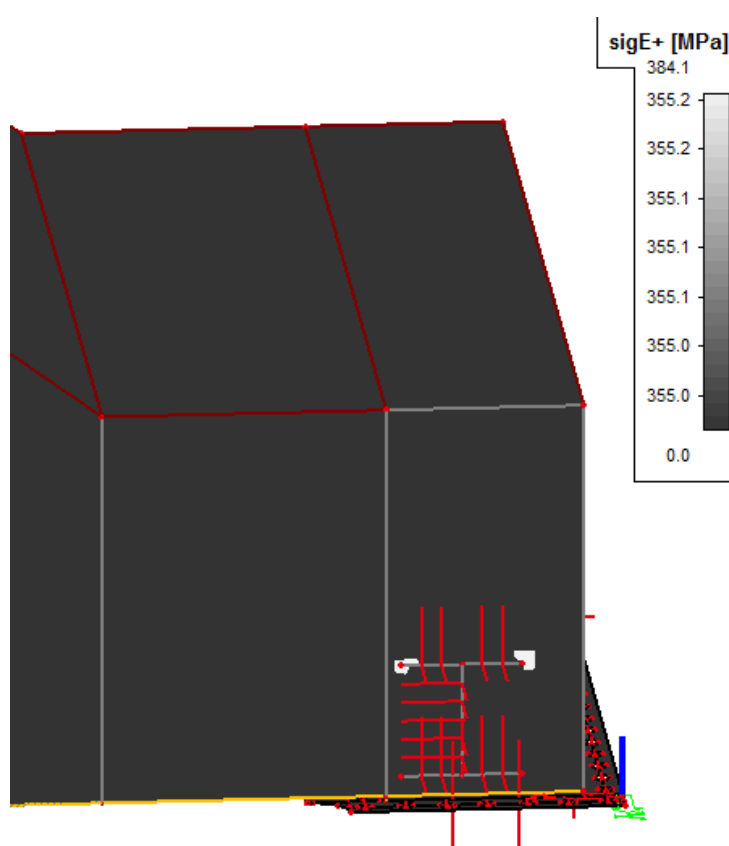


Obr. 264: Lokální zplastizovaná místa v okolí závěsů a připojení nosníku s bubnem (barva červená)

Z obrázku č. 263 je patrné, že v globálním pohledu na konstrukci nedochází nikde k dosažení napětí v hodnotě meze kluzu. Místa, kde se očekává lokální nárůst napětí nad mez kluzu oceli v případě materiálu se zpevněním, lze tedy lokalizovat do oblasti nejvíce zatížených závěsů. Po analýze s pracovním diagramem oceli s lineárním zpevněním dochází vlivem malé hodnoty zpevnění k mírnému nárůstu napětí v místě prvního nejvíce zatíženého závěsu a v místě nosníku pod uloženým bubnem. K téměř stejnému nárůstu dochází v případě vnějšího i vnitřního povrchu skořepiny.



Obr. 265: Lokální zplastizovaná oblast (v okolí závěsu konstrukce) pro materiál se zpevněním



Obr. 266: Lokální zplastizovaná oblast pro materiál se zpevněním

$$\sigma E^+ = 384,10 \text{ MPa}$$

$$\sigma E^- = 390,80 \text{ MPa}$$

Posudek celkové poměrné deformace

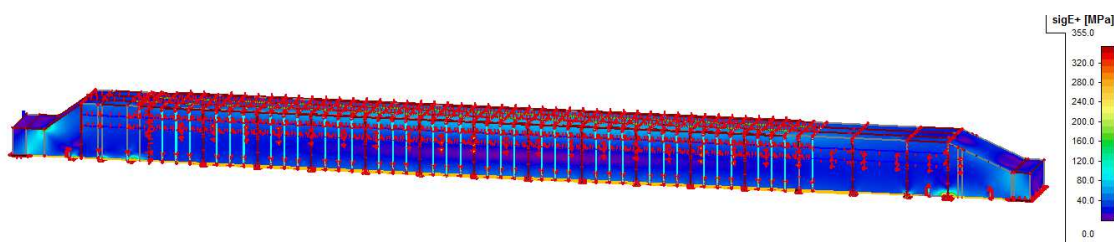
$$\varepsilon_{celk} = \frac{f_y}{E_1} + \frac{f_{max} - f_y}{E_p} = \frac{355}{210 \cdot 10^3} + \frac{390,80 - 355}{2100} = 1,69 \cdot 10^{-3} + 0,017 = 0,018$$

$$\varepsilon_{celk} = 0,018 \leq 0,05$$

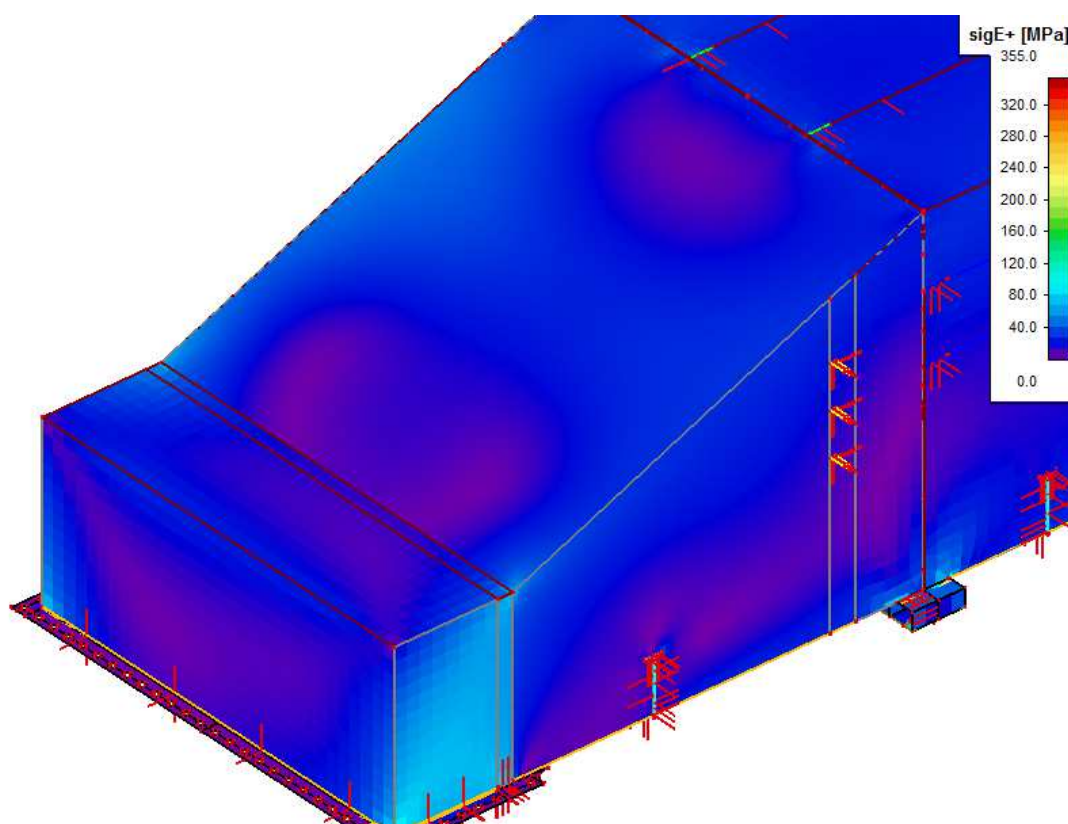
Poměrná deformace na povrchu skořepiny **vyhovuje** z hlediska celkové hlavní poměrné deformace.

8.8.2 Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální osovou sílu N

Podobně jako v případě předchozí kombinace zatížení dochází i zde ke zplastizování lokálních oblastí v místě připojení prvků na spodní pásnici nosníku případně na stěnu.

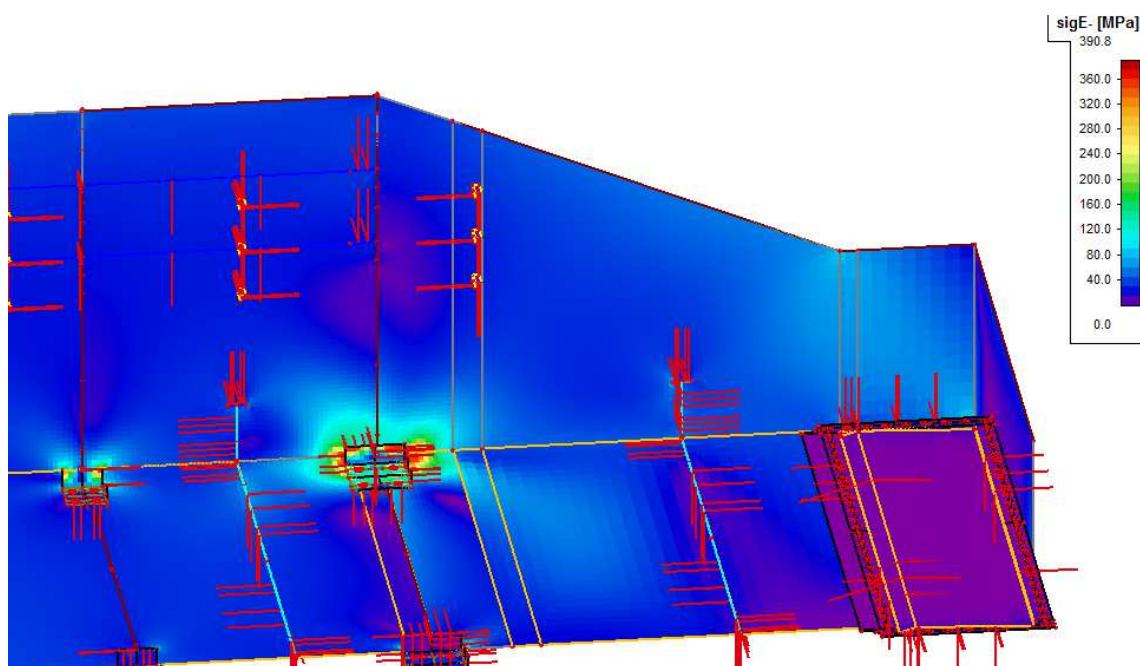


Obr. 267: Průběh napětí vnějšího povrchu skořepin



Obr. 268: Průběh napětí po geometricky a nelineární statické analýze v místě počáteční imperfekce

Opět jsou zasaženy plasticitním chováním lokální oblasti.



Obr. 269: Lokální zplastizované oblasti v místě připojení závěsu pro materiál se zpevněním

$$\sigma E^+ = 384,10 \text{ MPa}$$

$$\sigma E^- = 390,80 \text{ MPa}$$

Posudek celkové poměrné deformace

$$\varepsilon_{celk} = \frac{f_y}{E_1} + \frac{f_{max} - f_y}{E_p} = \frac{355}{210 \cdot 10^3} + \frac{390,80 - 355}{2100} = 1,69 \cdot 10^{-3} + 0,017 = 0,018$$

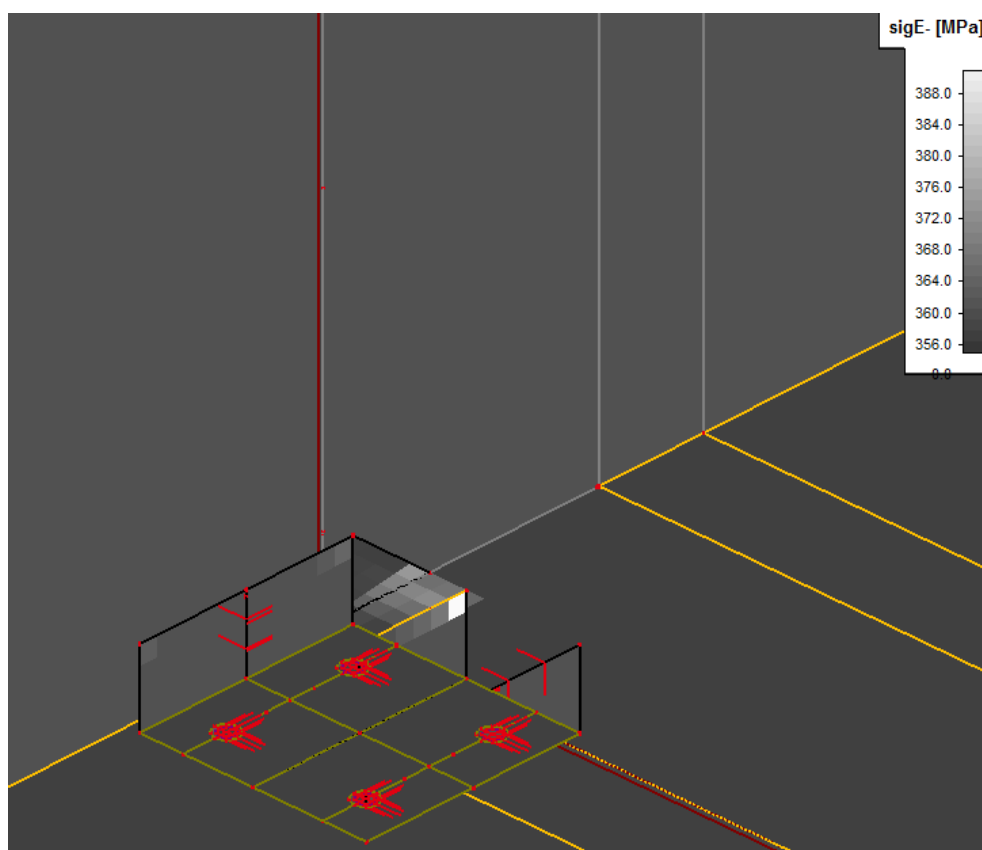
$$\varepsilon_{celk} = 0,018 \leq 0,05$$

Poměrná deformace na povrchu skořepiny **vyhovuje** z hlediska celkové hlavní poměrné deformace.

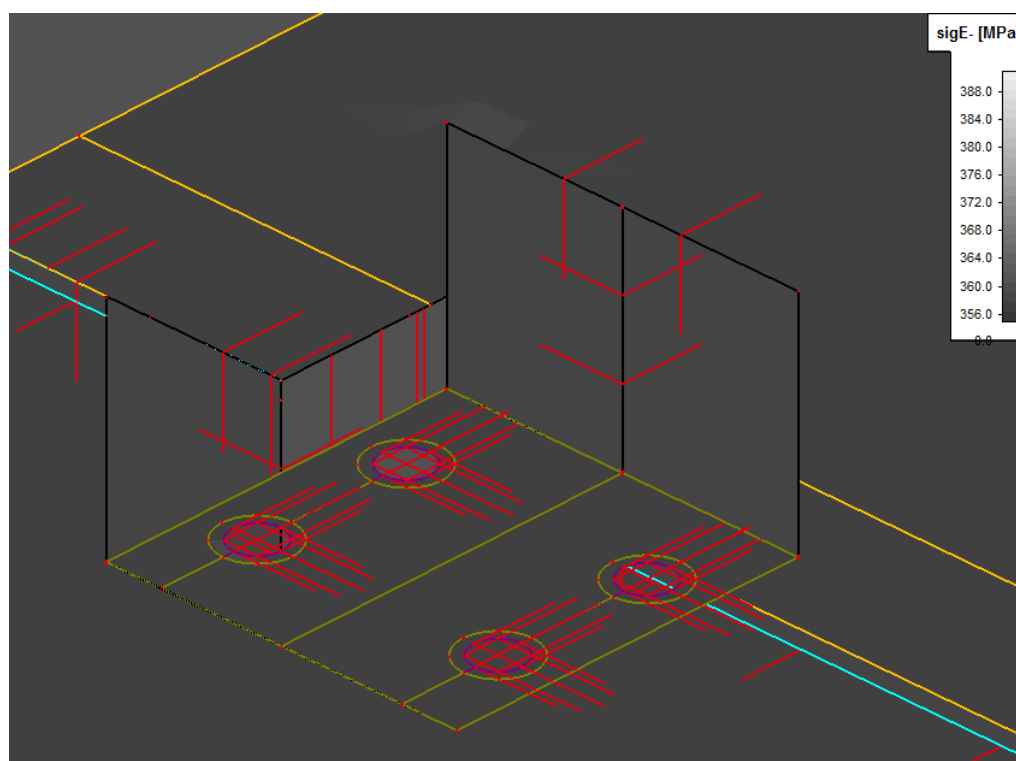
S ohledem na změnu počátečního imperfektního tvaru nedochází ke zplastizování konstrukce ve vyboulených oblastech a zplastizování nastává opět v lokálních místech styčníků. Proto pro posudek plastického chování materiálu není zapotřebí vyšetřovat ostatní počáteční imperfekce odpovídající jednotlivým stabilitním tvarům.

8.8.3 Geometricky a fyzikálně nelineární analýza konstrukce pro maximální smykovou sílu V_z

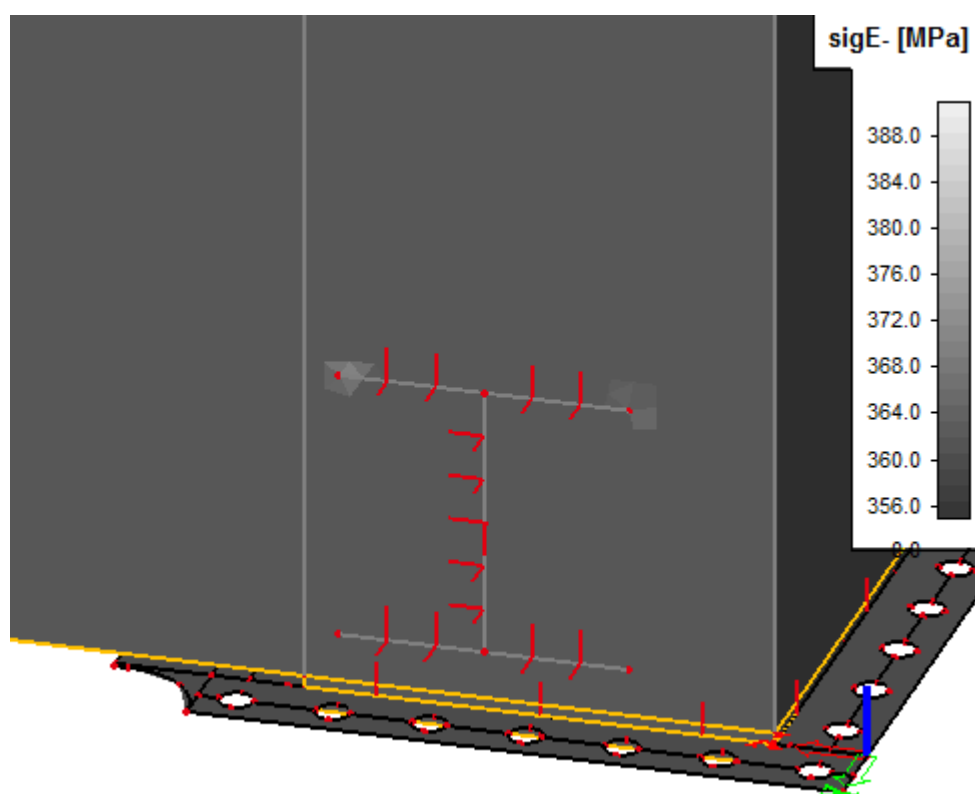
V případě geometricky a materiálově nelineární statické analýzy pro kombinaci, která vyvoluje maximální posouvající sílu V_z , vzniká napětí v lokálních oblastech napojení závěsů na hlavní nosník a v místě podporujícího nosník bubnu. Na obrázku č. 2270 až 272 jsou zobrazeny zplastizované oblasti s hodnotou napětí nad mezí kluzu 355 MPa.



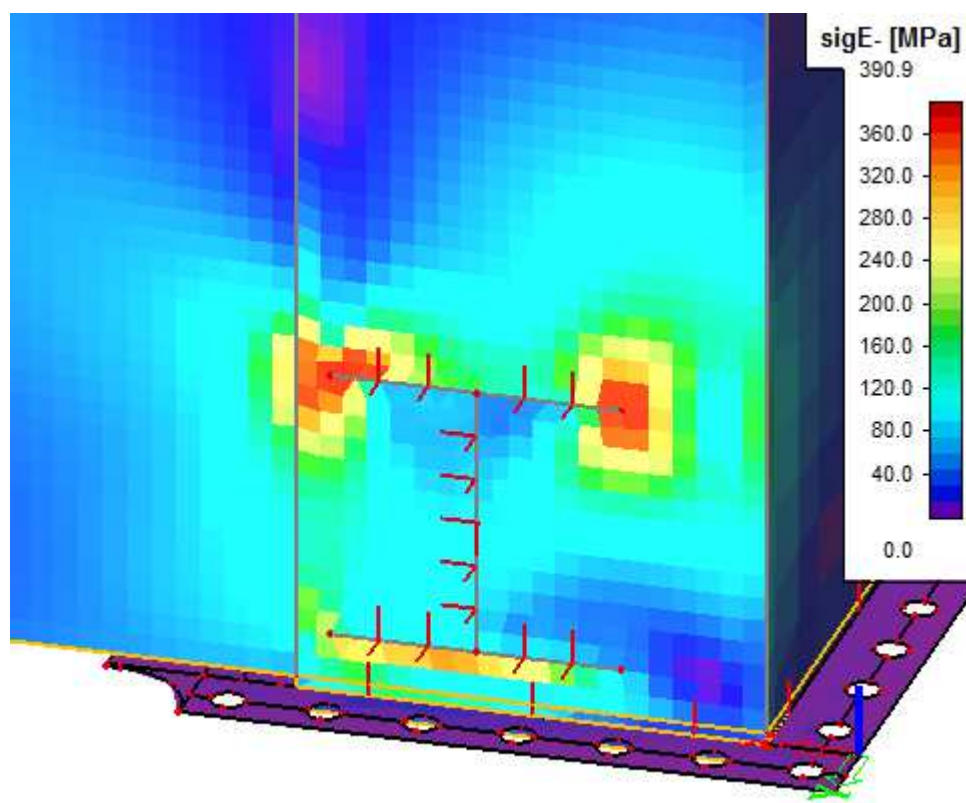
Obr. 270: Lokální zplastizované oblasti v místě prvního závěsu s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y



Obr. 271: Lokální zplastizované oblasti v místě poslední závěsu s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y



Obr. 272: Lokální zplastizované oblasti v napojení buben podporujícího nosníku s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y



Obr. 273: Průběh napětí v lokální zplastizované oblasti v napojení bubny podporujícího nosníku

$$\text{sig}E^+ = 390,9 \text{ MPa}$$

$$\text{sig}E^- = 384,3 \text{ MPa}$$

Posudek celkové poměrné deformace

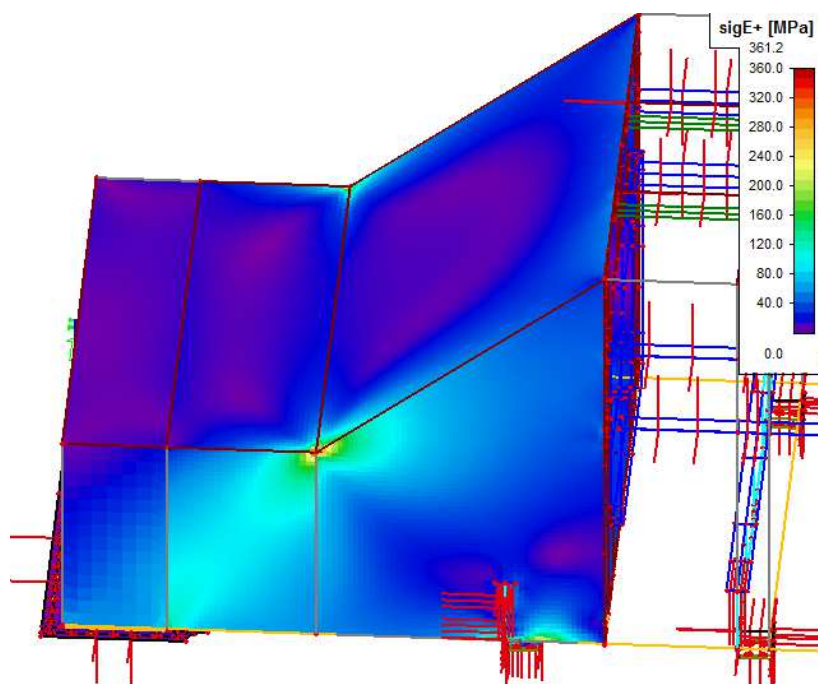
$$\varepsilon_{celk} = \frac{f_y}{E_1} + \frac{f_{max} - f_y}{E_p} = \frac{355}{210 \cdot 10^3} + \frac{390,90 - 355}{2100} = 1,69 \cdot 10^{-3} + 0,017 = 0,018$$

$$\varepsilon_{celk} = 0,018 \leq 0,05$$

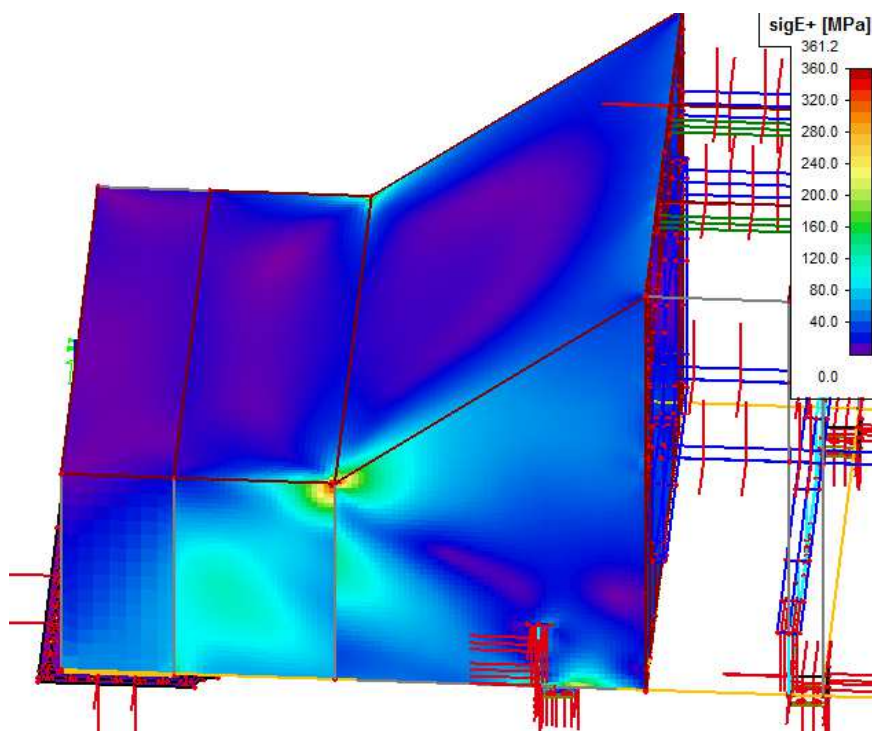
Poměrná deformace na povrchu skořepiny **vyhovuje** z hlediska celkové hlavní poměrné deformace.

Výpočet byl proveden pro počáteční imperfekce konstrukce podle stabilitních stavů popsaných výše. Porovnání průběhů napětí pro jednotlivé stabilitní stavy je zobrazeno na obrázku č. 274 a č. 275. Maximální hodnoty, které vznikají pouze lokální, nejsou nijak razantně ovlivněny změnou počáteční imperfekce konstrukce. Toto je dokázáno v tabulce č. 30, která zobrazuje

maximální globální hodnoty napětí pro geometricky a fyzikálně nelineární statickou analýzu.

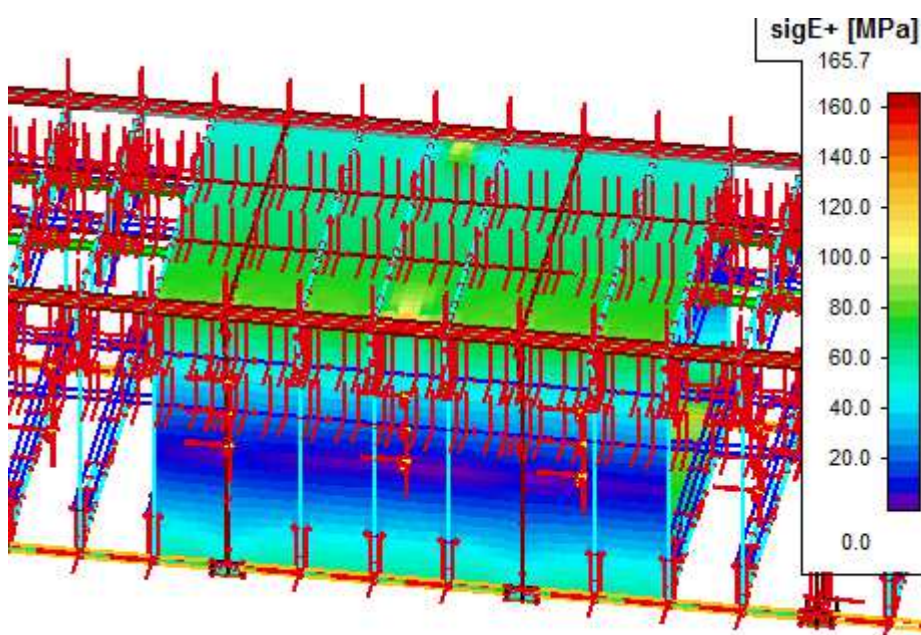


Obr. 274: Průběh napětí v místě levého vahadla pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvážení počáteční imperfekce

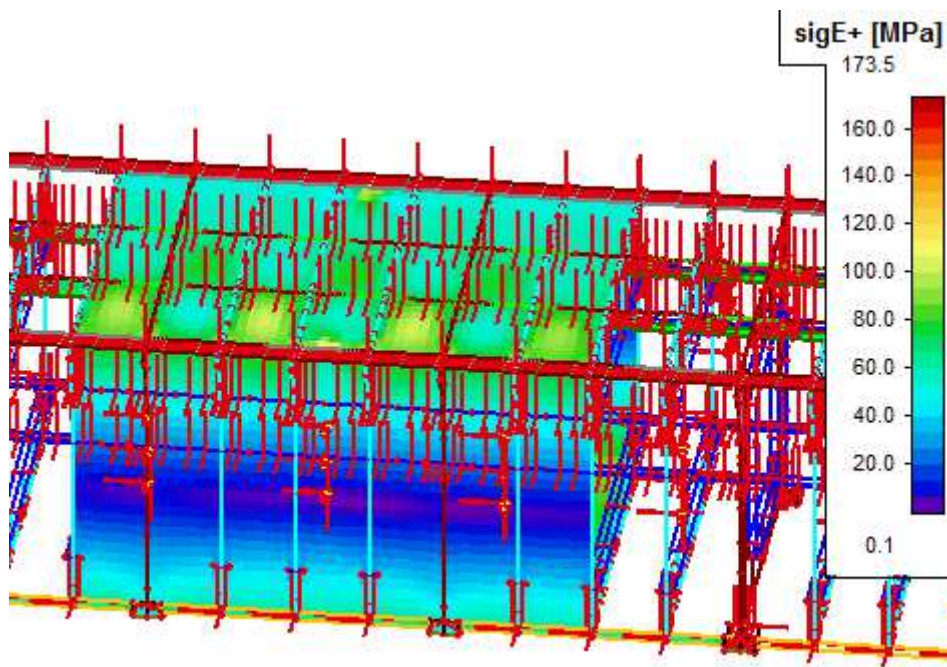


Obr. 275: Průběh napětí v místě levého vahadla pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícímu druhému stabilnímu tvaru

Na obrázcích je znatelně poznat, že se průběh napjatosti v místě zavedení imperfektního vyboulení stěny změní, ale nepřesahuje hodnota maximální hodnotu napětí v globálním měřítku.

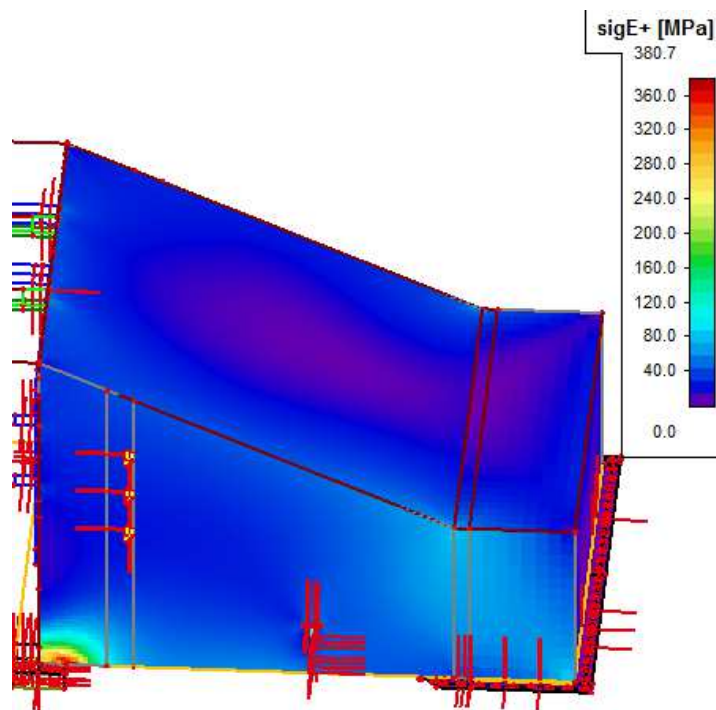


Obr. 276: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvážení počáteční imperfekce

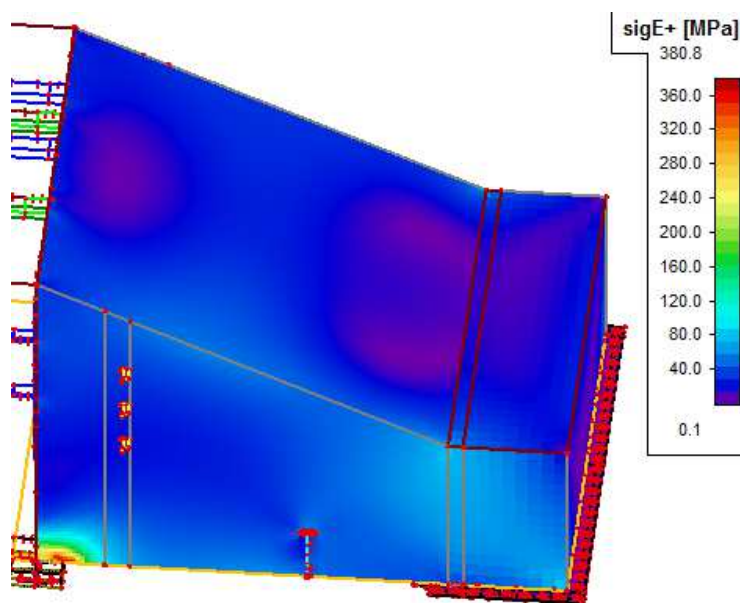


Obr. 277: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícímu devátému stabilitnímu tvaru

Zavedením imperfektního tvaru, který odpovídá vyboulení subpanelů horní tlačené pásnice dochází k nárůstu srovnávacího napětí na vnějším povrchu cca o 5 %. Konstrukce v tomto místě jistě **vyhoví** podmínce maximálního poměrného přetvoření.



Obr. 278: Průběh napětí v místě pravého vahadla pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvažování počáteční imperfekce



Obr. 279: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícím devátému stabilitnímu tvaru

Imperfekce stabilitního tvaru	sigE+ [MPa]	sigE- [MPa]
1	384,3	390,9
2	384,1	390,8
9	384,1	390,8

Tab. 30: Hodnoty globálních maximálních srovnávacích napětí

S ohledem na změnu počátečního imperfektního tvaru nedochází ke zplastizování konstrukce ve vyboulených oblastech s předepsanou ekvivalentní geometrickou deformací, pouze narůstá hodnota napětí, a zplastizování nastává v lokálních místech styčníků. Z tohoto důvodu rozhodují s ohledem na posouzení konstrukce lokální místa, kde dochází k mírnému nárůstu napětí nad mez kluzu oceli S355J0.

9 Závěr

Cílem diplomové práce byla statická analýza konstrukce mostového shrnovače a statický posudek hlavních nosných prvků společně se vzájemnými styčníky nacházejícími se v konstrukci. Mostový shrnovač je složen z několika hlavních částí – rozrušovací brány, vozíku s označením MBSk 600, konstrukce pro vyhrnovací řetěz a hlavního nosníku shrnovače, který je uložen na vahadlech. Návrh vahadel není předmětem diplomové práce, jsou převzaty z výkresové dokumentace pouze střednice vahadel pro správné podepření hlavního nosníku. Konstrukce je navržena z konstrukční oceli pevnostní třídy S355J0. Jednotlivé části konstrukce, rozrušovací brána a vozík MBSk600, byly zatíženy předepsaným technologickým provozním zatížením, dynamickým zatížením a zatížením proměnným a byla provedena geometrická nelineární statická analýza za použití software Scia Engineer. Ze software byly získány vnitřní síly, na které byly navrženy a posouzeny hlavní nosné prvky konstrukcí včetně styčnicků. V případě navrhování styčnicků rozrušovací brány byly navrženy styčníky svařené z trubkových profilů, které se posoudily na typické případy porušení těchto styčnicků. Styčníky vozíku byly navrženy jak svařované tak šroubované s předpokladem použití předepjatých šroubů z důvodu dynamického namáhání konstrukce.

Zvláštní kapitolou je statická analýza hlavního nosníku, který je tvořený uzavřeným tenkostěnným průřezem vyztuženým podélnými výztuhami v tlačené oblasti nosníku a také příčnými výztuhami. Průřez byl namodelován nejprve jako prutový model v software Scia Engineer, podepření bylo simulováno nehmotnými tuhými pruty kopírujícími střednice jednotlivých vahadel. Hlavní nosník je zatížen reakcemi od ostatním řešených konstrukcí, technologickým zatížením a zatížením od seismicity, jelikož je stroj umístěn v seizmicky aktivní oblasti Turecka ve městě Kirka. Byla provedena statická lineární pružnostní analýza pomocí které byly získány vnitřní síly. Jelikož se jedná o tenkostěnný průřez, bylo zapotřebí posoudit průřez s ohledem na lokální boulení subpanelů či celých stěn průřezu a to jak s ohledem na namáhání ohybové tak i smykové. Také bylo zapotřebí zohlednit lokální namáhání pod kolejnicí od zatížení vozíkem.

Následně byl hlavní nosník vymodelován pomocí 3D skořepinového modelu a zatížen příslušným zatížením odpovídajícím vzniku maximálních vnitřních sil na prutovém modelu. Skořepinový model umožnil vyšetřit konstrukci s ohledem na stabilitní chování pomocí software Scia Engineer. Byly stanoveny kritické

stabilitní stavy pro jednotlivé kombinace zatížení, které byly poté aplikovány jako počáteční imperfektní tvary konstrukce s velikostí ekvivalentní geometrické imperfekce jako vstupní parametr pro geometricky nelineární statickou analýzu včetně imperfektní konstrukci. Tato analýza umožňuje vystihnout posouzení konstrukce s ohledem na možný vznik boulení části stěn průřezu, kdy se zjistily maximální hodnoty srovnávacích napětí pro vybrané stabilitní tvary a byla konstrukce posouzena s ohledem na splnění plasticitní podmínky podle Huber-Mises-Henckyho podmínky plasticity. Následná použitá analýza respektuje možnost zplastizování materiálu a využívá bilineární pružnoplastický diagram oceli bez i se zpevněním současně s uvážením stejné počáteční imperfekce konstrukce jako v případě geometricky nelineární statické analýzy v předchozím posouzení konstrukce. Za pomoci software bylo provedeno analyzování oblastí, ve kterých dochází k překročení napětí nad hodnotu meze kluzu, pomoci použití fyzikálního a geometrického nelineárního výpočtu. Konstrukce nosníku byla posouzena s ohledem na splnění podmínky maximálního přetvoření.

Podle dosažených výsledků lze stanovit, že konstrukce mostového shrnovače borité rudy (vyjma konstrukcí vahadel) vyhovuje na mezní stavy únosnosti a mezní stavy použitelnosti.

Přínosem zpracování tématu této diplomové práce je pro autorku seznámení se s odlišnými typy konstrukcí, získání větší sebejistoty s ohledem na modelování prostorových konstrukcí a skořepinových numerických modelů v software Scia Engineer. Opravdu velkým přínosem bylo studium a aplikace posuzování tenkostěnných složitých uzavřených průřezů ať už analyticky nebo pomocí analýzy ve výpočetním software, studium možnosti posuzování konstrukcí s ohledem na použití geometricky a fyzikálně nelineární statické analýzy. Autorka získala větší rozhled v dané problematice a možností jejich aplikací a posunula se na vyšší úroveň z hlediska modelování a pochopení chování konstrukcí. Přehledný postup statického posouzení uzavřeného tenkostěnného průřezu může napomoci v případě statické analýzy obdobných průřezů.

10 Seznam obrázků a tabulek

10.1 Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Schéma bočního mostového shrnovače MBSk 600 [16]</i>	15
<i>Obr. 2: Posuzovaný mostový boční shrnovač MBSk 600 ve skládkové kryté hale v Turecku [20]</i>	16
<i>Obr. 3: Pracovní poloha rozrušovací brány [20]</i>	17
<i>Obr. 4: Půdorysné schéma konstrukce rozrušovací brány</i>	17
<i>Obr. 5: Boční síla způsobená rozrušováním</i>	18
<i>Obr. 6: Zatížení dynamické ve směru osy z+</i>	19
<i>Obr. 7: Zatížení dynamické ve směru osy x+</i>	19
<i>Obr. 8: Způsoby porušení trubkových styčníků</i>	20
<i>Obr. 9: Obsah nelineární kombinace (výstup ze software Scia Engineer)</i>	21
<i>Obr. 10: Posuzované pruty rozrušovací brány</i>	22
<i>Obr. 11: Posuzovaná diagonála rozrušovací brány</i>	28
<i>Obr. 12: Normálová síla v diagonále (výstup ze software Scia Engineer)</i>	29
<i>Obr. 13: Svislý průhyb konstrukce rozrušovače</i>	31
<i>Obr. 14: Vodorovný průhyb konstrukce rozrušovače</i>	32
<i>Obr. 15: Výstup ze software Scia Engineer – tvar 3D deformované konstrukce (vlevo brána v pracovní poloze, vpravo v horizontální poloze)</i>	32
<i>Obr. 16: Y-styčník</i>	34
<i>Obr. 17: K-styčník</i>	36
<i>Obr. 18: X-styčník</i>	38
<i>Obr. 19: Svarový přípoj diagonály pomocí styčnickového plechu</i>	43
<i>Obr. 20: Y-styčník</i>	44
<i>Obr. 21: Reálná fotografie čepového přípoje rozrušovače k vozíku [20]</i>	48
<i>Obr. 22: Geometrie čepového přípoje</i>	48
<i>Obr. 23: Reakce v místě čepového přípoje získané pomocí software Scia Engineer</i>	49
<i>Obr. 24: Působení reakcí v rovině čepu a směr výslednice</i>	50
<i>Obr. 25: Geometrie čepového přípoje</i>	50
<i>Obr. 26: Posuzovaná část prutu čepového přípoje</i>	51
<i>Obr. 27: Model části prutu čepového přípoje v software Scia Engineer</i>	51
<i>Obr. 28: Normálová síla N</i>	52
<i>Obr. 29: Posouvající síla V_z</i>	52
<i>Obr. 30: Ohybový moment M_y</i>	52
<i>Obr. 31: Von Misesovo napětí</i>	53
<i>Obr. 32: Geometrie čepového dvojstřížného přípoje</i>	54
<i>Obr. 33: Skořepinový model čepového spoje v horizontální poloze a deformovaná konstrukce</i>	56

Obr. 34: Von Misesovo napětí na čepovém spoji.....	56
Obr. 35: Skořepinový model čepového spoje v pracovní poloze a Von Misesovo napětí na spoji	57
Obr. 36: Konstrukční struktura ocelového lana (fa Elis) [15].....	58
Obr. 37: Geometrie konstrukce kladkostroje	60
Obr. 38: Technologické zatížení konstrukce kladkostroje	62
Obr. 39: Konstrukce vozíku	64
Obr. 40: Technologické zatížení vozíku	66
Obr. 41: Numerický model vozíku	66
Obr. 42: Ostatní stálá zatížení.....	67
Obr. 43: Zatížení užité.....	68
Obr. 44: Zatížení nárazem	69
Obr. 45: Zatížení dynamické ve směru osy z^+ , y^+ a x^+	70
Obr. 46: Zatížení dynamické ve směru osy z^+ , y^- a x^+	71
Obr. 47: Zatížení dynamické ve směru osy z^+ , y^- a x^-	72
Obr. 48: Zatížení od příčiny	73
Obr. 49: Zatížení od rozrušovací brány při pojezdu vozíku doprava.....	74
Obr. 50: Zatížení od rozrušovací brány při pojezdu vozíku doleva	75
Obr. 51: Numerický prutový model v software Scia Engineer.....	79
Obr. 52: Posuzovaný prvek – sloup SHS 250x250x12,5	80
Obr. 53: Posuzovaný prvek – SHS 120x120x8.....	85
Obr. 54: Posuzovaný prvek – SHS 200x200x10	89
Obr. 55: Schéma posuzovaného T-styčnicku	92
Obr. 56: Posuzovaný zalomený styčník sloupu konstrukce kladkostroje	95
Obr. 57: Posuzovaný svařovaný prostorový styčník konstrukce kladkostroje...	97
Obr. 58: Montážní spoj kladkostroje	101
Obr. 59: 3D deformovaná konstrukce kladkostroje	108
Obr. 60: Posuzovaný prvek – IPE 120	109
Obr. 61: Průběhy vnitřních sil pro kombinaci s maximální tahovou silou	109
Obr. 62: Posuzovaný prvek – HEA 160.....	114
Obr. 63: Průběh vnitřních sil na nosníku HEA 160 (vlevo N , vpravo M_y).....	114
Obr. 64: Posuzovaný prvek – HEA 200.....	118
Obr. 65: Průběh vnitřních sil na nosníku HEA 200 (vlevo N , vpravo M_y).....	118
Obr. 66: Posuzovaný prvek – HEA160.....	123
Obr. 67: Posuzovaný příčný nosník s náběhem.....	126
Obr. 68: Nosník s náběhy – příčný hlavní prvek vozíku	127
Obr. 69: Vnitřní síly na příčném nosníku (od shora N , M_y , M_z).....	127
Obr. 70: Posuzovaný podélný nosník vozíku	132
Obr. 71: Vnitřní síly na vodorovné nosníku (od shora N , M_y , M_z).....	132
Obr. 72: Posuzovaný sloup konstrukce vozíku	136
Obr. 73: Návrhové vnitřní síly sloupu vozíku – normálová síla N	137
Obr. 74: Návrhové vnitřní síly sloupu vozíku – ohybový moment M_y , M_z	137

Obr. 75: Posuzovaný prvek – výztuha 150x150x8	143
Obr. 76: Svarový přípoj nosníků IPE120 podporujících pochozí rošt	147
Obr. 77: Svarový přípoj nosníků HEA160	149
Obr. 78: Svarový přípoj nosníků HEA200	150
Obr. 79: Šroubový přípoj nosníku průřezu HEA160 a HEA200	152
Obr. 80: Šroubový přípoj příčného nosníku ke sloupu pomocí čelních desek	155
Obr. 81: Šroubový přípoj podélného nosníku ke sloupu pomocí čelních desek	164
Obr. 82: Zalomený svařovaný styčník	172
Obr. 83: Šroubový spoj v místě umístění čepu rozrušovače	174
Obr. 84: Šroubový spoj skloněné výztuhy s čelními deskami	180
Obr. 85: Šroubový spoj skloněné výztuhy s čelními deskami	184
Obr. 86: Svařovaný K styčník výztuh	187
Obr. 87: Statické schéma konstrukce vozíku v montážním stavu	194
Obr. 88: Posuzovaný sloup konstrukce vozíku	194
Obr. 89: Hodnota normálové síly sloupu v návrhových hodnotách	195
Obr. 90: Hodnota ohybového momentu M_y sloupu v návrhových hodnotách	195
Obr. 91: Hodnota ohybového momentu M_z sloupu v návrhových hodnotách	196
Obr. 92: Posuzovaná konstrukce vyhrnovacího řetězu	197
Obr. 93: Prutový model konstrukce v software Scia Engineer	197
Obr. 94: Stálé zatížení - tíha řetězu	200
Obr. 95: Proměnné zatížení od vyhrnovacího řetězu	201
Obr. 96: Proměnné zatížení od pohonu vyhrnovacího řetězu	202
Obr. 97: Dynamické zatížení ve směru osy z^+ , y^+ a x^+	202
Obr. 98: Dynamické zatížení ve směru osy z^+ , y^- a x^+	202
Obr. 99: Dynamické zatížení ve směru osy z^+ , y^- a x^-	203
Obr. 100: Schéma přípoje pomocí čelní desky	247
Obr. 101: Schéma svařovaného přípoje CHS 88,9x4 na pásnici sloupu HEB300	258
Obr. 102: Schéma svařovaného přípoje SHS 100x100x5 na pásnici sloupu HA200	259
Obr. 103: Schéma svařovaného přípoje SHS 100x100x5 na pásnici sloupu HA200	261
Obr. 104: Schéma svařovaného přípoje HEA200 na pásnici sloupu HEA200	263
Obr. 105: Schéma svařovaného přípoje SHS 150x100x5 na pásnici sloupu HEA200	267
Obr. 106: Schéma přípoje sloupku HEB300 s hlavní konstrukcí mostového shrnovače pomocí čelní desky	268
Obr. 107: Schéma přípoje sloupku HEA200 s hlavní konstrukcí mostového shrnovače pomocí čelní desky	272
Obr. 108: Tvar průřezu v místě hlavní příčné výztuhy	280
Obr. 109: Tvar vahadel	280

Obr. 110: Statický model konstrukce v software Scia Engineer.....	281
Obr. 111: Schéma rozmístění stálého zatížení	285
Obr. 112: Schéma poloh vozíku na mostové konstrukce	286
Obr. 113: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P1	286
Obr. 114: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P2	287
Obr. 115: Zatěžovací stav – pracovní poloha brány P3	287
Obr. 116: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H1	287
Obr. 117: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H2	287
Obr. 118: Zatěžovací stav – horizontální poloha brány H3	288
Obr. 119: Zatěžovací stav – užité pochozí roštů	288
Obr. 120: Zatěžovací stav – technologie P1	291
Obr. 121: Zatěžovací stav – technologie P2	291
Obr. 122: Zatěžovací stav – technologie P3	291
Obr. 123: Zatěžovací stav – náraz vozíku (poloha vozíku P1, H1)	291
Obr. 124: Zatěžovací stav – náraz vozíku (poloha vozíku P3, H3)	292
Obr. 125: Zatěžovací stav od příčiny vozíku P1	292
Obr. 126: Zatěžovací stav od příčiny vozíku P2	292
Obrázek 127: Zatěžovací stav od příčiny vozíku P3.....	292
Obr. 128: Umístění shrnovače v oblasti Turecka	293
Obr. 129: Turecko – mapa seismického zatížení [4].....	294
Obr. 130: Výstup ze software Scia Engineer – vodorovné spektrum pružné odezvy typu 1	297
Obr. 131: Výstup ze software Scia Engineer – vodorovné spektrum pružné odezvy typu 2	297
Obr. 132: Definování a zadání parametrů do software Scia Engineer pro jednotlivá spektra pružné odezvy	298
Obr. 133: Rozložení seismicity do jednotlivých směrů	298
Obr. 134: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní poloha rozrušovací brány P1	299
Obr. 135: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní rozrušovací poloha brány P2	299
Obr. 136: Vygenerovaná hmota ze zatěžovací stavu – pracovní rozrušovací poloha brány P3	299
Obr. 137: Rozdělení konstrukce na dílčí segmenty pro určení příslušných hmot	300
Obr. 138: Hmoty na konstrukci dle ručního výpočtu pro jednotlivé segmenty	303
Obr. 139: Deformovaná konstrukce pro 1. vlastní tvar.....	304
Obr. 140: Deformovaná konstrukce pro 2. vlastní tvar.....	304
Obr. 141: Průběh ohybové momentu od seismického zatížení.....	304
Obr. 142: Deformovaná konstrukce pro 1. vlastní tvar.....	305
Obr. 143: Deformovaná konstrukce pro 2. vlastní tvar.....	305
Obr. 144: Průběh ohybové momentu od seismického zatížení.....	306

Obr. 145: Příčné síly od zemětřesení	307
Obr. 146: Geometrie uzavřeného průřezu	309
Obr. 147: Importovaný průřez	311
Obr. 148: Průběh normálového napětí od normálové síly N	311
Obr. 149: Průběh normálového napětí od ohybového momentu M_y	312
Obr. 150: Průběh normálového napětí od ohybového momentu M_z	312
Obr. 151: Posuzovaná výztuha horní pásnice	318
Obr. 152: Průřez výztuhy horní pásnice	320
Obr. 153: Posuzovaná výztuha dolní pásnice	321
Obr. 154: Průřez výztuhy dolní pásnice	322
Obr. 155: Průřez výztuhy stěny průřezu	324
Obr. 156: Umístění příčných výztuh v průřezu	326
Obr. 157: Ohybový moment M_y	326
Obr. 158: Tlačená část průřezu – horní pásnice	327
Obr. 159: Efektivní účinný průřez horní pásnice s vlivem lokálního boulení ...	329
Obr. 160: Průběh momentů pro zjištění pérové konstanty	330
Obr. 161: Účinný průřez výztuhy	333
Obr. 162: Redukovaný účinný průřez tlačené pásnice	337
Obr. 163: Vyšetřovaná část průřezu - stěna	338
Obr. 164: Určení spolupůsobících částí stěny s výztuhou	341
Obr. 165: Účinný průřez horní výztuhy	342
Obr. 166: Účinný průřez spodní výztuhy	342
Obr. 167: Účinná průřezová plocha stěny v tlačené oblasti	346
Obr. 168: Redukovaný účinný průřez části tlačené stěny	349
Obr. 169: Redukovaný účinný průřez	350
Obr. 170: Poloha těžiště redukovaného průřezu	350
Obr. 171: Průběh ohybového momentu M_z	353
Obr. 172: Tlačená část průřezu – stěna	354
Obr. 173: Efektivní účinný průřez stěny s vlivem lokálního boulení	356
Obr. 174: Průběh momentů pro zjištění pérové konstanty	358
Obr. 175: Účinný průřez horní výztuhy stěny průřezu	362
Obr. 176: Redukovaný účinný průřez tlačené stěny průřezu	366
Obr. 177: Vyšetřovaná část průřezu – horní pásnice	367
Obr. 178: Efektivní účinný průřez horní pásnice s vlivem lokálního boulení ...	368
Obr. 179: Účinný průřez horní výztuhy	369
Obr. 180: Účinná průřezová plocha pásnice v tlačené oblasti	371
Obr. 181: Průřez a namáhání spodní pásnice nosníku	373
Obr. 182: Účinná čist tlačené spodní pásnice průřezu	374
Obr. 183: Redukovaný účinný průřez	375
Obr. 184: Poloha těžiště redukovaného průřezu	376
Obr. 185: Průběh normálové síly N	379
Obr. 186: Účinný průřez pro namáhání tlakem	381

Obr. 187: Poloha těžiště účinného průřezu pro namáhání tlakem	381
Obr. 188: Průřez v náběhu nosníku	395
Obr. 189: Redukovaný průřez – pro namáhání kladným ohybovým momentem	397
Obr. 190: Redukovaný průřez	400
Obr. 191: Redukovaný průřez	402
Obr. 192: Průřez na okraji nosníku.....	406
Obr. 193: Redukovaný průřez – pro namáhání kladným ohybovým momentem	409
Obr. 194: Redukovaný průřez – pro namáhání záporným ohybovým momentem	410
Obr. 195: Redukovaný průřez	414
Obr. 196: Redukovaný průřez	417
Obr. 197: Schéma vyztuženého panelu a spolupůsobící části stěny s výztuhou	422
Obr. 198: Schéma vyztuženého panelu a spolupůsobící části pásnice s výztuhou	425
Obr. 199: Nalevo originální rozměry kolejnice A 75 a napravo efektivní rozměry kolejnice s opotřebením pod pojižděným povrchem	436
Obr. 200: Schéma roznosu zatížení od příčné lokální síly	437
Obr. 201: Průběh napětí ve stěně průřezu od lokálního zatížení [19].....	439
Obr. 202: Průběh normálového napětí v horní pásnici průřezu	440
Obr. 203: Vtlačení stojiny do pásnice	444
Obr. 204: Svislá deformace konstrukce od proměnných zatížení	448
Obr. 205: Vodorovná deformace konstrukce od proměnných zatížení	449
Obr. 206: Tvary deformované konstrukce pro proměnná zatížení	449
Obr. 207: Skořepinový model celé konstrukce	452
Obr. 208: Skořepinový model příčných výztuh nosníku	452
Obr. 209: Detail hlavní příčné výztuhy (vlevo pohled, vpravo řez)	453
Obr. 210: Pomocná konstrukce pro roznos bodové reakce	453
Obr. 211: Zatěžovací stav od vlastní tíhy konstrukce vyhrnovacího řetězu	453
Obr. 212: Zatěžovací stav vlastní tíha kolejnice A 75	454
Obr. 213: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P1	455
Obr. 214: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P2	455
Obr. 215: Zatěžovací stav vlastní tíha vozíku – poloha P3	455
Obr. 216: Zatěžovací stav vlastní tíha od technologického zařízení	456
Obr. 217: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1	457
Obr. 218: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1	457
Obr. 219: Zatěžovací stav technologické zatížení od vozíku – poloha P1	458
Obr. 220: Zatěžovací stav od provozu konstrukce pro vyhrnovací řetěz	458
Obr. 221: Lokální zjemnění sítě konečných prvků	459
Obr. 222: První stabilitní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z	460

Obr. 223: Druhý stabilní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z (vpravo deformace ve směru osy y)	461
Obr. 224: Devátý stabilní tvar - kombinace pro smykovou sílu V_z	462
Obr. 225: Devátý stabilní tvar – deformace horní pásnice ve směru osy z ..	462
Obr. 226: Dvacátý druhý stabilní tvar konstrukce s kritickým násobitelem zatížení $\alpha_{cr} = 8,01$	463
Obr. 227: První stabilní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z	464
Obr. 228: Čtvrtý stabilní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z $\alpha_{cr} = 4,56$	465
Obr. 229: Desátý stabilní tvar - kombinace pro ohybový moment M_y a M_z (nahore boční pohled, dole půdorys) $\alpha_{cr} = 7,18$	465
Obr. 230: Třetí stabilní tvar - kombinace pro normálovou sílu N $\alpha_{cr} = 4,36$	466
Obr. 231: Čtvrtý stabilní tvar - kombinace pro normálovou sílu N $\alpha_{cr} = 4,71$	467
Obr. 232: Třináctý stabilní tvar - pohled	468
Obr. 233: Třináctý stabilní tvar - kombinace pro normálovou sílu N $\alpha_{cr} = 7,49$	468
Obr. 234: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet.....	471
Obr. 235: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	472
Obr. 236: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – první stabilní tvar	472
Obr. 237: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet.....	472
Obr. 238: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	473
Obr. 239: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – druhý stabilní tvar	473
Obr. 240: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - lineární výpočet.....	474
Obr. 241: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	474
Obr. 242: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální smykové síly V_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – devátý stabilní tvar	475
Obr. 243: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet	478
Obr. 244: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	478
Obr. 245: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – první stabilní tvar	479

Obr. 246: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet	479
Obr. 247: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	479
Obr. 248: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – druhý stabilní tvar	480
Obr. 249: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - lineární výpočet	480
Obr. 250: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	481
Obr. 251: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci ohybové momenty M_y a M_z - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – desátý stabilní tvar.....	481
Obr. 252: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet	485
Obr. 253: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	485
Obr. 254: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – třetí stabilní tvar.....	485
Obr. 255: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet	486
Obr. 256: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	486
Obr. 257: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – čtvrtý stabilní tvar	486
Obr. 258: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - lineární výpočet	487
Obr. 259: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci maximální normálovou sílu N - nelineární výpočet bez počáteční imperfekce	487
Obr. 260: Průběh srovnávacího napětí pro kombinaci ohybové momenty normálovou sílu N - nelineární výpočet s počáteční imperfekcí – třináctý stabilní tvar	488
Obr. 261: Bilineární pracovní diagram oceli pružno-plastický bez zpevnění...	490
Obr. 262: Bilineární pracovní diagram oceli pružno-plastický s lineárním zpevněním.....	491
Obr. 263: Průběh napětí vnějšího povrchu skořepin	492
Obr. 264: Lokální zplastizovaná místa v okolí závěsů a připojení nosníku s bubnem (barva červená)	492
Obr. 265: Lokální zplastizovaná oblast (v okolí závěsu konstrukce) pro materiál se zpevněním	493
Obr. 266: Lokální zplastizovaná oblast pro materiál se zpevněním	493
Obr. 267: Průběh napětí vnějšího povrchu skořepin	494

Obr. 268: Průběh napětí po geometricky a nelineární statické analýze v místě počáteční imperfekce	494
Obr. 269: Lokální zplastizované oblasti v místě připojení závěsu pro materiál se zpevněním.....	495
Obr. 270: Lokální zplastizované oblasti v místě prvního závěsu s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y	496
Obr. 271: Lokální zplastizované oblasti v místě poslední závěsu s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y	497
Obr. 272: Lokální zplastizované oblasti v napojení buben podporujícího nosníku s hodnotou napětí nad mezí kluzu oceli f_y	497
Obr. 273: Průběh napětí v lokální zplastizované oblasti v napojení buben podporujícího nosníku	498
Obr. 274: Průběh napětí v místě levého vahadla pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvážení počáteční imperfekce.....	499
Obr. 275: Průběh napětí v místě levého vahadla pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícímu druhému stabilitnímu tvaru ..	499
Obr. 276: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvážení počáteční imperfekce	500
Obr. 277: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícímu devátému stabilitnímu tvaru	500
Obr. 278: Průběh napětí v místě pravého vahadla pro vnější povrch skořepiny pro konstrukci bez uvážení počáteční imperfekce	501
Obr. 279: Průběh napětí ve střední části nosníku pro vnější povrch skořepiny při počátečním imperfektním tvaru odpovídajícímu devátému stabilitnímu tvaru	501

10.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Jmenovitá únosnost lana v kN (fa Elis) [15]	59
Tab. 2: Zatížení a charakteristiky pochozího roštu [18]	63
Tab. 3: Zatížení a charakteristiky pochozího roštu pro vozík [18]	76
Tab. 4: Reakce od stálého zatížení - konstrukce pro vyhrnovací řetěz	284
Tab. 5: Reakce od stálého zatížení – konstrukce vozíku	285
Tab. 6: Reakce od proměnného zatížení – pochozí rošty konstrukce vozíku ..	288
Tab. 7: Reakce od proměnného zatížení - konstrukce pro vyhrnovací řetěz ..	289
Tab. 8: Reakce od proměnného zatížení – pracovní poloha brány vozíku	290
Tab. 9: Reakce od proměnného zatížení – horizontální poloha brány vozíku ..	290
Tab. 10: Hodnoty referenčního zrychlení půdy pro jednotlivé oblasti [12]	295
Tab. 11: Třídy významu pozemních staveb dle [12]	295
Tab. 12: Typy základových půd dle [12]	296
Tab. 13: Výstup ze software Scia Engineer – vlastní frekvence	303
Tab. 14: Rozdělení smykové síly do míst jednotlivých hmot	308
Tab. 15: Charakteristiky kolejnic A 75	436
Tab. 16: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce	469
Tab. 17: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (1. stabilitní tvar)	470
Tab. 18: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (2. stabilitní tvar)	470
Tab. 19: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (9. stabilitní tvar)	471
Tab. 20: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce	476
Tab. 21: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (1. stabilitní tvar)	476
Tab. 22: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (2. stabilitní tvar)	477
Tab. 23: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (10. stabilitní tvar)	477
Tab. 24: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce	482
Tab. 25: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (3. stabilitní tvar)	483
Tab. 26: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (4. stabilitní tvar)	483
Tab. 27: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza s počáteční imperfekcí (13. stabilitní tvar)	484

<i>Tab. 28: Srovnávací napětí – lineární statická analýza.....</i>	<i>488</i>
<i>Tab. 29: Srovnávací napětí – geometrická nelineární statická analýza bez počáteční imperfekce</i>	<i>489</i>
<i>Tab. 30: Hodnoty globálních maximálních srovnávacích napětí</i>	<i>502</i>

11 Seznam použitých pramenů

11.1 Literatura

- [1] Benda J.
Stavební statika II., Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006
- [2] Ocelové konstrukce 2 – Cvičení
Ocelové konstrukce 2, Skriptum ČVUT v Praze, 2011
- [3] Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 „Plated structural elements“. ECCS, October 2007, ISSN – 1018-5593
- [4] G. Solomos, A. Pinto, S. Dimova: A review of the seismic hazard zonation in national building codes in the context of Eurocode 8, JRC, 2008, Italy

11.2. Normy

- [5] ČSN EN 1991-1-1 (Eurokód 1)
Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení, Praha, ČNI 2004
- [6] ČSN EN 1991-3 (Eurokód 1)
Zatížení konstrukcí – Část 3: Zatížení od jeřábů a strojního vybavení, Praha, ČNI 2008
- [7] ČSN EN 1993-1-1 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha, ČNI 2006
- [8] ČSN EN 1993-1-5 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn, Praha, ČNI 2008
- [9] ČSN EN 1993-1-6 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí, Praha, ČNI 2008

- [10] ČSN EN 1993-1-8 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování ocelových konstrukcí – navrhování styčníků, Praha, ČNI 2006
- [11] ČSN EN 1993-1-11 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-11: Navrhování ocelových tažených prvků, Praha, ČNI 2008
- [12] ČSN EN 1998-1 (Eurokód 8)
Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby, Praha, ČNI 2006
- [13] ČSN 27 7008
Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel, nakladačů a zakladačů, 1991

11.3. Internetové zdroje

- [14] Odkaz na internetové stránky Ing. Víta Křivého, Ph.D. [online]
Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/krivy/podk/podk.html>
- [15] Odkaz na internetové stránky fa Elis s r.o. [online]
Dostupné z: www.ocadovalana.cz
- [16] Odkaz na internetové stránky firmy VÍTKOVICE MACHINERY GROUP.
[online] Dostupné z: www.vitkovice.cz
- [17] Odkaz na internetové stránky Prof. Ing. Josef Macháček, Dr.Sc. [online]
Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/>
- [18] Internetový odkaz firmy Lichtgitter – pochozí rošty [online]
Dostupné z: www.lichtgitter.cz
- [19] Časopis Konstrukce – odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství
[online] Dostupné z: www.konstrukce.cz

11.4. Podklady

- [20] Výkresová dokumentace a fotodokumentace – VITCRANE s r.o.

12 Seznam příloh

A. Technická zpráva ocelové konstrukce

B. Výkaz materiálu konstrukce

C. Výkresová dokumentace

Část 1: Rozrušovací brána

Výkres č. 1.1: Půdorys a řez rozrušovací brány	M 1:75
Výkres č. 1.2: Detail č. 1 a detail č. 2	M 1:20
Výkres č. 1.3: Detail č. 3	M 1:10
Výkres č. 1.4a: Detail č. 4	M 1:10
Výkres č. 1.4b: Detail č. 4	M 1:10

Část 2: Vozík MBSk 600

Výkres č. 2.1: Půdorys a pohled vozíku A-A', B-B'	M 1:50
Výkres č. 2.2: Detail č. 5	M 1:10
Výkres č. 2.3: Detail č. 6 a detail č. 7	M 1:10
Výkres č. 2.4: Detail č. 8 a detail č. 9	M 1:10
Výkres č. 2.5: Detail č. 10	M 1:10
Výkres č. 2.6: Detail č. 11	M 1:10
Výkres č. 2.7: Detail č. 12	M 1:10
Výkres č. 2.8: Detail č. 13 a detail č. 14	M 1:10
Výkres č. 2.9: Detail č. 15	M 1:10

Část 3: Konstrukce vyhrnovacího řetězu

Výkres č. 3.1A: Pohledy a řezy konstrukce	M 1:100
Výkres č. 3.1B: Půdorysy a pohled konstrukce	M 1:100
Výkres č. 3.2: Detail č. 16 a detail č. 17	M 1:10
Výkres č. 3.3: Detail č. 18	M 1:10
Výkres č. 3.4: Detail č. 19	M 1:10

Výkres č. 3.5: Detail č. 20

M 1:10

Část 4: Konstrukce hlavního nosníku

Výkres č. 4.1: Pohledy a řezy konstrukce

M 1:100

13 Použitý programový software

Scia Engineer 2015	Výpočetní software pro statické výpočty (Verze 14, 15.1, 15.2)
AutoCAD 2015	Grafický software pro tvorbu projektové dokumentace
MS Excel 2013	Tabulkový procesor
MS Word 2013	Textový editor

A. Technická zpráva

Technická zpráva ocelové konstrukce

Mostový nakladač borité rudy

Akce: Mostový nakladač borité rudy – Diplomová práce

Objednatel: VŠB – TU Ostrava

17. listopadu 2172/15

Fakulta stavební – Katedra konstrukcí 221

Vypracoval: Bc. Monika Kubzová

Kontroloval: doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.

Datum: Listopad 2015

Obsah technické zprávy

1	Předmět projektu	3
2	Seznam norem, odborné literatury a podkladů	3
2.1	Použité normy	3
2.2	Odborná literatura	4
2.3	Podklady	4
3	Popis konstrukce.....	4
4	Statické řešení	6
4.1	Globální analýza konstrukce	6
4.2	Statický model konstrukce	7
4.3	Stabilitní řešení	8
5	Ocelová konstrukce.....	8
5.1	Materiál	8
5.2	Posouzení nosných profilů	9
5.3	Skladba profilů	9
6	Ochrana proti korozi.....	11
7	Ochrana proti požáru	12
8	Výroba.....	12
9	Montáž ocelové konstrukce	12
10	Bezpečnost práce	12
11	Závěr	13

1 Předmět projektu

V projektu je zpracován návrh a statické posouzení nosných prvků a styčníků jednotlivých částí mostového shrnovače borité rudy, to je rozrušovací brány, vozíku MBSk 600, konstrukce pro vyhrnovací řetěz a samotného hlavního uzavřeného tenkostěnného nosníku shrnovače. Předmětem projektu není statická analýza vahadel.

2 Seznam norem, odborné literatury a podkladů

2.1 Použité normy

- [1] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-1 (Eurokód 1)
Zatížení konstrukcí – Obecná zatížení, Praha, ČNI 2004
- [3] ČSN EN 1993-1-1 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha, ČNI 2006
- [4] ČSN EN 1993-1-5 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn, Praha, ČNI 2008
- [5] ČSN EN 1993-1-6 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-6: Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí, Praha, ČNI 2008
- [6] ČSN EN 1993-1-8 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování ocelových konstrukcí – navrhování styčníků, Praha, ČNI 2006
- [7] ČSN EN 1993-1-11 (Eurokód 3)
Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-11: Navrhování ocelových tažených prvků, Praha, ČNI 2008
- [8] ČSN EN 1998-1 (Eurokód 8) *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení - Část 1: Obecná pravidla, seizmická zatížení a pravidla pro pozemní stavby*, Praha, ČNI 2006

- [9] ČSN 27 7008
Navrhování ocelových konstrukcí rýpadel, nakladačů a zakladačů, 1991

2.2 Odborná literatura

- [10] Benda J.
Stavební statika II., Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006
- [11] Ocelové konstrukce 2 – Cvičení
Ocelové konstrukce 2, Skriptum ČVUT v Praze, 2011
- [12] Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 „Plated structural elements“. ECCS, October 2007, ISSN – 1018-5593
- [13] G. Solomos, A. Pinto, S. Dimova: A review of the seismic hazard zonation in national building codes in the context of Eurocode 8, JRC, 2008, Italy

2.3 Podklady

- [14] výkresová dokumentace a fotodokumentace – fa VITCRANE s r.o.

3 Popis konstrukce

Ocelová konstrukce mostového shrnovače je složena z rozrušovací brány, vozíku MBSk 600, konstrukce pro vyhrnovací řetěz a samotné hlavní nosné konstrukce. Rozrušovací brána je rovinná prutová konstrukce tvořena hlavními profily RO 159x5 a diagonály jsou navrženy profilu RO 133,5x5. Rozrušovací brána je připojena k vozíku MBSk 600 pomocí čepového přípoje. Celkem se v konstrukci nachází dvě brány s celkovou hmotností cca 8,2 tun.

Konstrukce vozíku MBSk 600 je tvořena profily válcovanými a uzavřenými svařovanými atypickými i standardními profily. Je rozdělena na čtyři montážní celky, které budou pomocí montážních spojů spojeny v jeden celek na místě působení konstrukce. Statické schéma konstrukce je v provozním stavu odlišné od statického působení při montáži. Půdorysné rozměry vozíku jsou 10,850 m a na šířku 4,0 m. Konstrukce vozíku se skládá z konstrukce pro uchycení lan (konstrukce pro kladkostroj), která je svařená a pomocí šroubovaného montážní

spoje připojena ke konstrukci spodní. Pojezd vozíku na hlavním nosníku je omezen na 9 m, a ukončení pojezdu je opatřeno nárazníky. Hmotnost konstrukce vozíku je cca 14 tun.

Konstrukce pro vyhrnovací řetěz je umístěna pod hlavním nosníkem, ke kterému je připojena pomocí závěsů s čelními deskami. Konstrukce je navržena z válcovaných profilů. Konstrukce je délky cca 32,080 m, šířky 2 až 2,2 m a výšky 1,6 m. Na konstrukci je umístěn řetěz, který slouží k odstranění odtěžené borité rudy z prostoru konstrukce. Dále je zde umístěná poháněcí technologie. Konstrukce pro vyhrnovací řetěz váží cca 10,5 tun.

Hlavní nosná konstrukce je uložena na vahadlech. Je tvořena uzavřeným tenkostěnným průřezem, v místě vahadel s náběhy od 1,08 do 2,08 m. Nosník je vyztužen podélnými výztuhami profilu Li 60x8 a profilu $\frac{1}{2}$ IPE200. Dále je vyztužený hlavními příčnými výztuhami po vzdálenosti cca 2,0 m, ve kterých je opatřen průlezný prostor pro revizi a kontrolu nosníku a mezilehlým příčným ztužením horní a dolní pásnice průřezu. Předpokládá se, že z hlediska montáže je konstrukce rozdělena na tři části, které jsou zkompletovány v dílně a na místě působení konstrukce svařeny tupým svarem s provařením a s vybroušením. Délka nosníku je 37 m. Výška komorového průřezu je 2,08 m a šířka 2,412 m. Na průřezu jsou umístěny kolejnice typu A75, která je uložena ve vzdálenosti 6,3 m až do vzdálenosti 28,1 m měřené od levého vahadla. Váha hlavního nosníku je cca 60 tun.

Podpěření konstrukce na obou stranách vahadel zabraňuje podélnému posunu, na obou stranách je konstrukce podepřena ve svislém směru kolejnicemi pro pojíždění vahadel a na pravé straně vahadla je konstrukce uložena bez příčného posunu (jelikož levé vahadlo umožňuje a má velkou vůli při pohybu na kolejnici).

Spoje montážních dílků jsou navrženy šroubované se šrouby třídy pevnosti 8.8 a předepjaté z důvodu působení dynamického namáhání konstrukce. Celková hmotnost konstrukce včetně vahadel je cca 165 tun.

4 Statické řešení

4.1 Globální analýza konstrukce

Jednotlivé části shrnovače jsou řešeny jako konstrukce v prostorové obecné pracovní rovině s využitím statického software Scia Engineer 2015. V případě rozrušovací brány, vozíku MBSk 600 a konstrukce pro vyhrnovací řetěz je použita geometricky nelineární statická analýza. Pro řešení hlavního nosníku se seismickým zatížením je aplikována lineární statická analýza. V případě šetření chování skořepinového modelu hlavního nosníku je využita statická analýza geometricky i fyzikálně nelineární v software Scia Engineer. Zatížení a kombinace zatížení jsou stanoveny v souladu s Eurokódý EN 1990, EN 1991 a ČSN 27 7008. Do globální analýzy konstrukce jsou zavedena následující zatížení:

Rozrušovací brána

Vlastní tíha	generováno softwarem
Proměnné zatížení	od technologie
Dynamické zatížení	stanoveno v souladu s ČSN 277008

Vozík MBSk 600

Vlastní tíha	generováno softwarem
Ostatní stálé zatížení	zatížení od pochozích roštů, zábradlí, technologie apod.
Proměnné zatížení	od technologie
Proměnné užité zatížení	pochozích roštů
Dynamické zatížení	stanoveno v souladu s ČSN 277008

Konstrukce pro vyhrnovací řetěz

Vlastní tíha	generováno softwarem
Ostatní stálé zatížení	technologie

Proměnné zatížení	od technologie
Dynamické zatížení	stanoveno v souladu s ČSN 277008
Mimořádné zatížení	náraz vozíku

Hlavní nosník – prutový model

Vlastní tíha	generováno softwarem
Ostatní stálé zatížení	výztuhy nenaimportovány s průřezem, technologie
Proměnné zatížení	od technologie
Mimořádné zatížení	seismicita pro oblast Turecko město Kirka
Mimořádné zatížení	náraz vozíku do nárazníků

Hlavní nosník – 3D skořepinový model

Vlastní tíha	generováno softwarem
Ostatní stálé zatížení	kabina, rozvodna
Proměnné zatížení	od technologie

Podrobnosti k jednotlivým zatížením a k uvažovaným kombinacím zatížení jsou uvedeny ve statickém posudku ocelové konstrukce. Zatížení dynamické bylo rozpočítáno na jednotlivé prvky konstrukce pomocí zatěžovacích šířek prvků, ostatní plošná zatížení jsou aplikována s využitím funkce zatěžovacích panelů v software Scia Engineer.

4.2 Statický model konstrukce

Rozrušovací brána je tvořena prutovým modelem v prostorové pracovní rovině v software Scia Engineer. Veškeré styčníky jsou modelovány jako rámově působící. Konstrukce je podepřena v místě čepového přípoje kloubově.

Vozík MBSk600 je modelovaný jako prostorový prutový model se svislými podporami v místě uložení na kolejnice typu A75. Vodorovné podpory jsou umístěny v místech pojezdu po stranách hlavního nosníku. A podélná reakce je umístěna téměř do střednice konstrukce v úrovni horní pásnice hlavního nosníku a představuje brzdu vozíku. Téměř všechny styčníky na konstrukci jsou modelovány jako rámové.

Konstrukce pro vyhrnovací řetěz je v pracovní obecné rovině vytvořena jako prutová soustava prvků s rámovými i kloubovými přípoji, která je ztužená v podélném směru diagonálními profily RO 88,9x4,0.

Hlavní nosník je nejdříve vyšetřen jako prutový model, který je podepřený uložením vahadel na kolejnice. Excentricita přípoje je modelována s použitím střednic vahadel. Skořepinový model je tvořený plochami střednic v software Scia Engineer a dochází v místě vahadel k napojení na prutovou soustavu a podepření v koncových uzlech prutů reprezentujících střednice vahadel. Je zajištěno veškeré propojení jednotlivých ploch a jejich vzájemné spolupůsobení.

4.3 Stabilitní řešení

Vzpěrné délky tlačných prvků, všech ztužidel pro vybočení v rovině i z roviny rámu jsou rovny systémovým délkám (vzdálenost styčníků), jelikož byl použit výpočet geometricky nelineární. V případě hlavního nosníku jsou stanoveny analyticky.

5 Ocelová konstrukce

5.1 Materiál

Všechny nosné prvky ocelové konstrukce jsou navrženy z oceli jakostní třídy S355J0. Použitý válcovaný materiál musí být v souladu s normami technických dodacích podmínek EN 10025-1 a EN 10025-2. Šrouby jsou navrženy z třídy pevnosti 8.8 předepnuté.

5.2 Posouzení nosných profilů

Všechny nosné ocelové prvky jsou navrženy a posouzeny na maximální vnitřní síly z globální analýzy ve výpočetním programu Scia Engineer 2015. Dále je skořepinový model posouzen na hodnotu srovnávacího napětí podle plasticitní podmínky HMM platící pro ocelové konstrukce. Srovnávací napětí je získáno statickou nelineární analýzou s metodou výpočtu pro skořepiny Newton-Rabson. Prvky jsou posouzeny podle platných evropských norem skupiny EN 1993 a normy ČSN 27 7008.

5.3 Skladba profilů

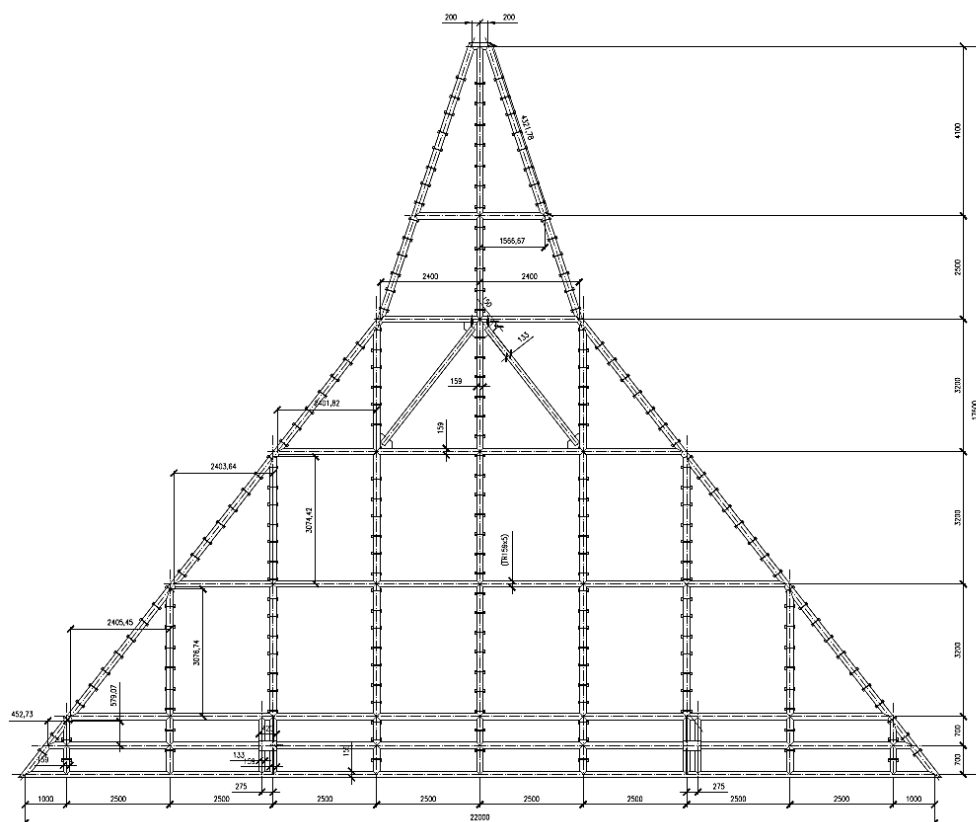
Rozrušovací brána

Vodorovné a příčné prvky

RO 159x5

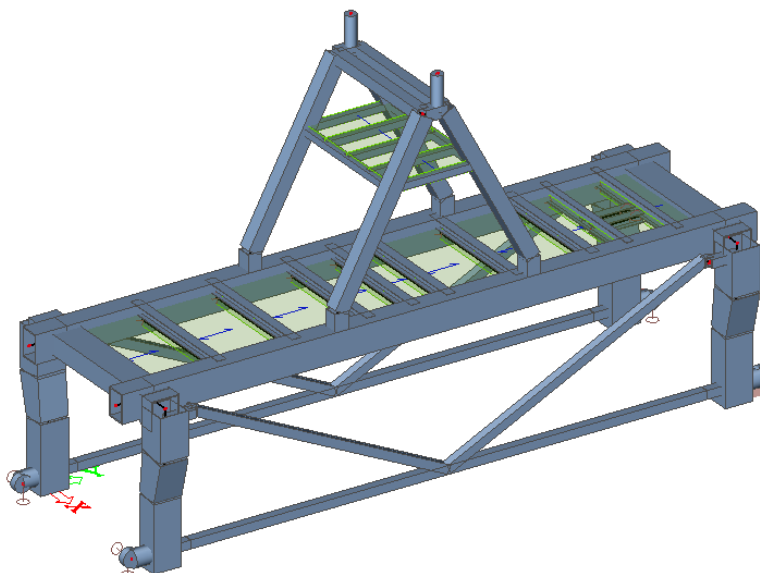
Diagonální prvky

RO 133,5x5



Vozík MBSk 600

Sloup kladkostroje		SHS 250x250x12,5
Příčný horní nosník kladkostroje		SHS 200x200x10,0
Příčný nosník pod rošty		SHS 120x120x8,0
Podélný nosník	svařovaný průřez	- 500x350x16 (20)
Sloupy	svařený průřez	- spodní část 500x390x12,0 - horní část 500x500x12,0
Příčný nosník	svařený průřez	- krajní část 500x500x16,0 - střední část 500x350x16,0
Příčný nosník pod rošty		IPE 120
Příčné nosníky pod technologií		HEA 160, HEA 200
Podélné ztužení vozíku		SHS 150x150x8,0



Konstrukce pro vyhrnovací řetěz

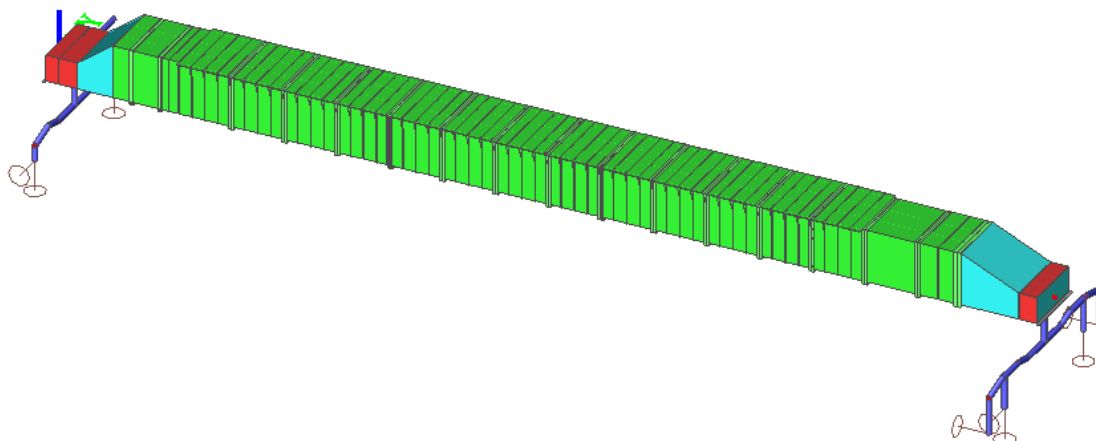
Hlavní sloup	HEB 300
Krajní sloup	HEB 160

Mezilehlé sloupy	HEA 200
Podélný nosník	HEA 200, ½ IPE 120, HEB 160
Hlavní příčný nosník	SHS 120x80x5,0 SHS 100x150x5,0
Mezilehlý příčný nosník	SHS 100x100x5,0



Hlavní nosník konstrukce

Krajní průřez	svařovaný průřez – 1,008 x 2,412 x 16 (24)
Vnitřní průřez	svařovaný průřez – 2,008 x 2,412 x 12 (16)



6 Ochrana proti korozi

Všechny nosné prvky budou žárově pozinkovány. Vrstva zinku musí být navržena pro stupeň korozní agresivity C3 dle ČSN EN ISO 12944-2 a předpokládanou návrhovou životnost 50 let. Šrouby jsou předepsány rovněž v žárově pozinkované úpravě.

7 Ochrana proti požáru

Nosná konstrukce v nechráněném stavu vyhovuje požadavku na požární odolnost R15. V případě požadavků na vyšší požární odolnost je potřeba provést opatření k zajištění požární odolnosti – např. protipožárními nátěry či obklady.

8 Výroba

Ocelová konstrukce je navržena ve výrobní skupině EXC3 podle normy ČSN EN 1090-2 +A1. Přesnost montáže a osazení konstrukce a navazujících konstrukcí musí odpovídat ČSN 73 0210-1 Geometrická přesnost ve výstavbě. Podmínky provádění. Část 1: Přesnost osazení.

9 Montáž ocelové konstrukce

Jednotlivé montážní celky budou zhotoveny na území České Republiky a následně převezeny na místo působení konstrukce kde budou zkonstruovány do celku. Montáž ocelové konstrukce musí být prováděna odborně způsobilou firmou za účasti kvalifikovaných osob a pod vedením osoby s patřičnou autorizací. Montáž musí respektovat obecná pravidla pro montáž ocelových konstrukcí a musí být v souladu se statickou funkcí jednotlivých prvků. Změny proti projektu se musí konzultovat s projektantem.

10 Bezpečnost práce

Práce musí být prováděny v souladu s projektovou dokumentací a v rozsahu stavebního povolení vydaného na základě místních podmínek a dle platných technologických a bezpečnostních předpisů a na základě ustanovení platných norem ČSN, resp. EN.

Veškeré práce na staveništi musí být prováděny osobami pro jednotlivé činnosti řádně kvalifikovanými a proškolenými a pod dozorem osob oprávněných dle platného právního řádu. Při všech pracích v průběhu realizace stavby musí být

dodržen právní rámec platný na území Turecka, zejména pak ustanovení závazných předpisů a nařízení:

- Vyhlášky č. 324/1990 Sb. Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu ze dne 31. 6. 1990 o bezpečnosti práce a technických zařízení při stavebních pracích.
- Nařízení vlády č. 378/2001 Sb. ze dne 12. 9. 2001, kterým se stanoví bližší požadavky na bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, přístrojů a nářadí
- Nařízení vlády č. 502/2000 Sb. ze dne 27. 10. 2000 o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.
- Nařízení a vyhlášky platné na území Turecka.

11 Závěr

Navržená konstrukce vychází z podkladů stavebního projektu a zatěžovacích údajů platných pro navrhování v daném území. Navržená nosná OK vyhovuje na I. mezní stav únosnosti a na II. mezní stav použitelnosti a vyhovuje podmínce HMM s ohledem na použití geometricky a fyzikálně nelineární statické analýzy.

V Klimkovicích dne 27. listopadu 2015

.....

Doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.

.....

Bc. Monika Kubzová

B. Výkaz materiálu konstrukce

VÝKAZ MATERIÁLU

Akce	Diplomová práce - Mostový nakladač borité rudy						VŠB - TUO		
Dílec	Rozrušovací brána		2 x						
Č. výkresu						Datum	20.11.2015		
Výkaz ocelové konstrukce									
Pol.	Profil	Kusů	Délka	Šířka	Délka (plocha) celkem	Hmotnost /jedm.	Hmot.	Mat.	Pozn.
			[mm]	[mm]	[m] ([m2])	[kg/m]([kg/m2])	[kg]		
TR1	TR 159x5	1	400	-	0,400	19,00	7,6	S 355J0	
TR2	TR 159x5	1	4100	-	4,100	19,00	77,9	S 355J0	
TR3	TR 159x5	2	4321,78	-	8,644	19,00	164,2	S 355J0	
TR4	TR 159x5	1	2500	-	2,500	19,00	47,5	S 355J0	
TR5	TR 159x5	2	2635,23	-	5,270	19,00	100,1	S 355J0	
TR6	TR 159x5	15	3200	-	48,000	19,00	912,0	S 355J0	
TR7	TR 159x5	2	4124,06	-	8,248	19,00	156,7	S 355J0	
TR8	TR 159x5	2	4059,11	-	8,118	19,00	154,2	S 355J0	
TR9	TR 159x5	2	5942,71	-	11,885	19,00	225,8	S 355J0	
TR10	TR 159x5	28	2500	-	70,000	19,00	1330,0	S 355J0	
TR11	TR 159x5	1	22000	-	22,000	19,00	418,0	S 355J0	
TR12	TR 159x5	2	1566,67	-	3,133	19,00	59,5	S 355J0	
TR13	TR 159x5	2	453,73	-	0,907	19,00	17,2	S 355J0	
TR14	TR 159x5	14	700	-	9,800	19,00	186,2	S 355J0	
RO1	TR 133x5	2	3560	-	7,120	15,80	112,5	S 355J0	
RO2	TR 133x5	4	700	-	2,800	15,80	44,2	S 355J0	

VÝKAZ MATERIÁLU

Akce	Diplomová práce - Mostový nakladač borité rudy								
Dílec	Vozík MBSk 600	1 x					VŠB - TUO		
Č. výkresu						Datum	20.11.2015		
Výkaz ocelové konstrukce									
Pol.	Profil	Kusů	Délka	Šírka	Délka (plocha) celkem	Hmotnost /jedn.	Hmot.	Mat.	Pozn.
			[mm]	[mm]	[m] ([m ²])	[kg/m]/([kg/m ²])	[kg]		
H1	IPE 120	5	2050	-	10,250	10,40	106,6	S 355J0	
H2	HEA 160	2	2050	-	4,100	30,40	124,6	S 355J0	
H3	HEA 200	2	2050	-	4,100	42,30	173,4	S 355J0	
H4	HEA 160	2	900	-	1,800	30,40	54,7	S 355J0	
H5	INDIVIDUAL	2	3900	-	7,800	1499,00	1499,0	S 355J0	Odečteno ze software Scia Engineer
S1	SHS 250x12,5	4	3254,298	-	13,017	88,00	1145,5	S 355J0	
S2	SHS 250x12,5	4	631	-	2,524	88,00	222,1	S 355J0	
S3	INDIVIDUAL	4	2125,29	-	8,501	1861,60	1861,6	S 355J0	Odečteno ze software Scia Engineer
P1	SHS 200x10	2	2400	-	4,800	57,00	273,6	S 355J0	
P2	SHS 120x8	5	1545,471	-	7,727	26,40	204,0	S 355J0	
P3	SHS 120x8	2	2400	-	4,800	26,40	126,7	S 355J0	
P4	SHS 200x10	2	378	-	0,756	57,00	43,1	S 355J0	
P5	INDIVIDUAL	2	10770	-	21,540	5140,30	5140,3	S 355J0	Odečteno ze software Scia Engineer
V1	SHS 150x8	4	5243,56	-	20,974	34,00	713,1	S 355J0	
V2	SHS 150x8	4	150	-	0,600	34,00	20,4	S 355J0	
V3	SHS 150x8	2	9770	-	19,540	34,00	664,4	S 355J0	
Celkem ocel S 235							0 kg		
Celkem ocel S 355							12373 kg		
Celkem ocel							12373 kg		
Přídavek 15 %							1856 kg		
Celkem ocel							14229 kg		

VÝKAZ MATERIÁLU

[illegible]

VÝKAZ MATERIÁLU

[illegible]

VÝKAZ MATERIÁLU

[illegible]